

Самородов В. Б.,
Бондаренко А. І.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЛЬМУВАННЯ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА «FENDT 936 VARIO»

Описано процес обробки поздовжніх та бокових прискорень, що отримані в результаті експериментального дослідження гальмування трактора з гідروоб'ємно-механічною трансмісією «Fendt 936 Vario», визначенні значення гальмівного шляху та максимального відхилення від заданої траєкторії при службовому та екстремому гальмуванні на дорогах з різним коефіцієнтом зчеплення (сухий асфальт, мокрий асфальт, сніг), проведено порівняльний аналіз результатів експериментального та теоретичного дослідження.

Ключові слова: гальмування, гідрооб'ємно-механічна трансмісія, експериментальне дослідження, гальмівний шлях.

1. Вступ

Прагнення до безступінчастого регулювання швидкості, спрощення конструкції трансмісії, забезпечення плавності руху з місця, підвищення тягової динаміки та ергономічних властивостей при виконанні різноманітних технологічних операцій, підвищення середніх швидкостей руху по бездоріжжю призвело до необхідності обладнання гідрооб'ємно-механічною трансмісією (ГОМТ) серійно випускаємих колісних сільськогосподарських тракторів.

Зростаючий обсяг виробництва сільськогосподарської продукції неможливий без збільшення об'ємів транспортних перевезень в даній галузі. Широка номенклатура вантажів, що перевозяться, різкі коливання в потребі транспорту протягом року є передумовами ефективного використання колісних тракторів в сільському господарстві. В той же час з підвищенням транспортних швидкостей колісних тракторів загострюється проблема збереження безпеки в режимі гальмування.

З появою нових ГОМТ, підвищенням максимальних швидкостей руху колісних тракторів, застосуванням антиблокувальних систем постало гостро питання в необхідності виявити та систематизувати вплив способів службового та екстремого гальмування, умов експлуатації на кінематичні, силові та енергетичні параметри ГОМТ різних структур, а також керованість та гальмівну ефективність.

Результати теоретичного та експериментального дослідження, як правило, відрізняються один від одного. Похибка залежить від припущень, що вводяться при складанні математичних моделей, методики, за якою складається модель, чутливості датчиків, якості аналого-цифрового перетво-

рювача та інших чинників. Більш достовірними, як правило, є результати, що отримані шляхом експериментальних досліджень.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Використання акселерометрів в процесі експериментальних досліджень обумовлене можливістю визначення величини поздовжніх, бокових і вертикальних прискорень транспортних засобів [1, 2], оцінці їх аеродинамічних [3], тягово-швидкісних, гальмівних якостей, керованості та стійкості [4], плавності руху та інше [5].

З роботи [4] відомий мобільний вимірювальний комплекс, що розроблений на кафедрі технології машинобудування і ремонту машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, який, зокрема, і використовувався науковцями кафедри автомобіле- і тракторобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» при дослідженні процесу гальмування трактора «Fendt 936 Vario» [6].

Основним етапом обробки поздовжніх та бокових прискорень, що отримані в результаті експериментального дослідження, являється вибір методу фільтрації [7]. Є ряд публікацій [8–10], присвячених дослідженню та аналізу різноманітних методів фільтрації, проте у роботах [11, 12] рекомендується використання лише фільтрів нижніх частот Баттерворта (за винятком кута повороту рульового колеса і кутової швидкості рульового колеса).

В науковій праці [13] запропоновано математичну модель процесу гальмування трактора Fendt з ГОМТ, адекватність якої підлягає підтвердженню. В роботі [6] наведена методика експерименталь-

ного дослідження впливу способу гальмування на керованість та гальмівну ефективність даного трактора, описано принцип дії приладів та апаратури, що використовувалися при випробуваннях.

Метою даної роботи є аналіз результатів експериментального дослідження процесу гальмування колісного трактора «Fendt 936 Vario», проведеного за методикою з роботи [6], та перевірка адекватності математичної моделі, що наведена в науковій праці [13].

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- описати процес обробки поздовжніх та бокових прискорень, що отримані в результаті експериментального дослідження гальмування трактора «Fendt 936 Vario»;
- визначити при службовому та екстремому гальмуванні на дорогах з різним коефіцієнтом зчеплення (сухий асфальт, мокрий асфальт, сніг) значення гальмівного шляху та максимального відхилення від заданої траєкторії;
- провести порівняльний аналіз результатів експериментального та теоретичного дослідження.

3. Експериментальні дані і їх обробка

Фільтром називають частотно-виборчий пристрій, який пропускає сигнали певних частот і затримує або ослаблює сигнали інших частот. По вигляду амплітудно-частотних характеристик вони підрозділяються на фільтри нижніх частот, верхніх частот, смугові, режекторні та фазові. На практиці широко застосовуються методи фільтрації Чебишева, Баттерворта, Бесселя і критичного загасання [11]. У роботі [12] рекомендується наступний протокол фільтрації для всіх каналів (за винятком кута повороту рульового колеса і кутової швидкості рульового колеса) — використання фільтрів нижніх частот Баттерворта.

Методика обробки даних, приведена в Глобальних технічних правилах № 8 [12], включає вимоги до методів фільтрації даних, оскільки різні методи фільтрації можуть суттєво впливати на кінцеві результати. Зокрема, рекомендується використання низькочастотного фільтру Баттерворта, а також виставлення на нуль відфільтрованих даних. Виставлення на нуль виконується з метою усунення зсуву сигналу датчика з використанням статичних даних, зареєстрованих до випробування.

Для автоматизації обробки одержуваних з акселерометрів даних зручно використовувати вільно розповсюджене програмне забезпечення «Фільтр Баттерворта». Алгоритм роботи даної програми заснований на дискретному перетворенні Фур'є, яке широко використовується в статистиці, при аналізі тимчасових рядів [11].

Використання фільтрів нижніх частот Баттерворта 12-го порядку з частотою відсічення 6 Гц

згідно вимог [12] призводить до зниження рівня шуму початкового сигналу.

В цілому, фільтрація даних, що одержуються за допомогою акселерометрів з використанням фільтрів нижніх частот Баттерворта дозволяє підвищити точність експериментальної оцінки експлуатаційних властивостей колісних машин [11].

Розглянемо більш детально процес обробки експериментальних даних з акселерометрів, знаходження гальмівного шляху S_g та максимального відхилення від заданої траєкторії Δ_{\max} . Не зважаючи на те, що акселерометри MMA7260QT з трьома робочими осями [6], обробці будуть підлягати лише поздовжні (стовбець X1) та бокові (стовбець Y1) прискорення (рис. 1).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Время		X1	Y1	Z1	тем-ра1	
2	0		-0,43675	0,905483	-10,5825	6	
3	0,0135		-0,08146	0,431753	-10,0693	6	
4	0,027125		-0,19989	-1,54212	-9,91136	6	
5	0,04075		-0,43675	-0,51571	-9,63502	6	
6	0,054375		-0,27884	-0,83153	-9,3192	6	
7	0,068		-0,08146	-1,26578	-8,80599	6	

Рис. 1. Візуалізація фіксації та збереження результатів експериментального дослідження з акселерометра

Після фіксації результатів відбувається виставлення на нуль поздовжніх та бокових прискорень. По завершенні створюються файли в форматі «CSV (MS-DOS) (*.csv)», в перший файл заноситься стовбець «время» та значення поздовжніх прискорень зі стовбця X1 з виставленим на нуль першим значенням прискорень та скоректованими подальшими значеннями (з кожного наступного віднімається значення першого прискорення), а в другий файл, відповідно, заноситься стовбець «время» та скоректовані значення бокових прискорень зі стовбця Y1.

Наступним кроком є відкриття за допомогою програмного забезпечення «Фільтр Баттерворта» файлів, створених в форматі «CSV (MS-DOS) (*.csv)».

На рис. 2 наведений зовнішній вигляд діалогових вікон програмного забезпечення «Фільтр Баттерворта» при обробці даних, а на рис. 3 результати фільтрації.

Після використання низькочастотного фільтру Баттерворта, а також збереження і виставлення на нуль відфільтрованих даних необхідно виконати подвійне інтегрування прискорень в системі Matlab за допомогою підсистеми моделювання динамічних процесів Simulink.

Як приклад, на рис. 4 наведені початкові та відфільтровані значення поздовжніх прискорень при гальмуванні трактора на дорозі, що вкрито льодом, (ведучий задній міст, $P_{kr} = 0$ кН) зі швидкості 40 км/год джойстиком на I ступені уповільнення [6], а на рис. 5 значення швидкості трактора та гальмівний шлях.

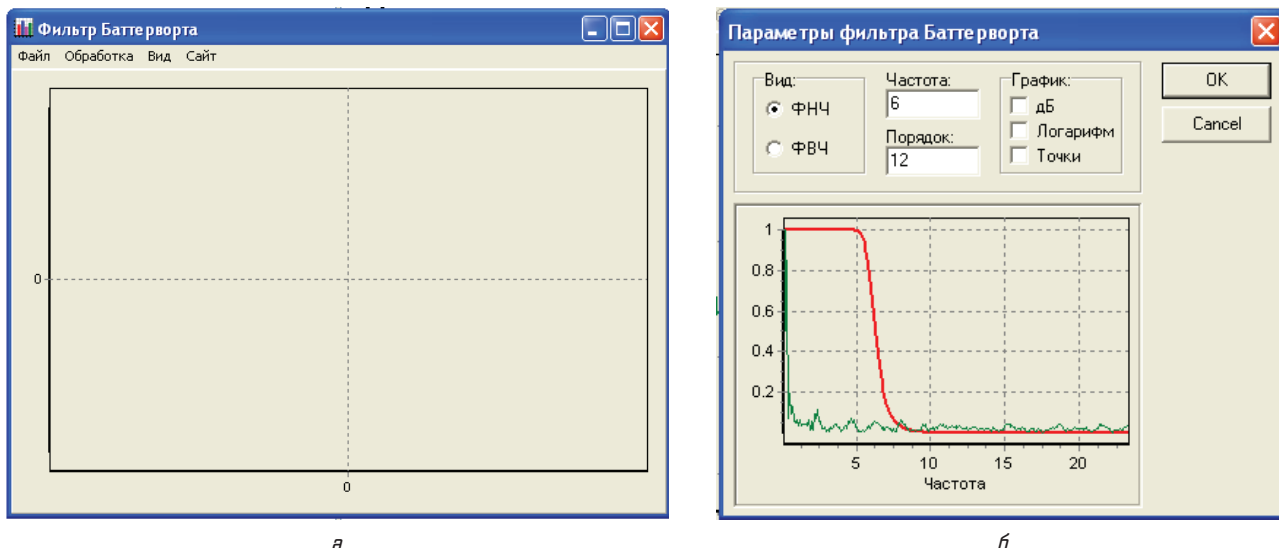


Рис. 2. Зовнішній вигляд діалогових вікон програмного забезпечення «Фільтр Баттерворта»: а — діалогове вікно для імпорту вихідних даних; б — настройка параметрів фільтра згідно вимог [12]

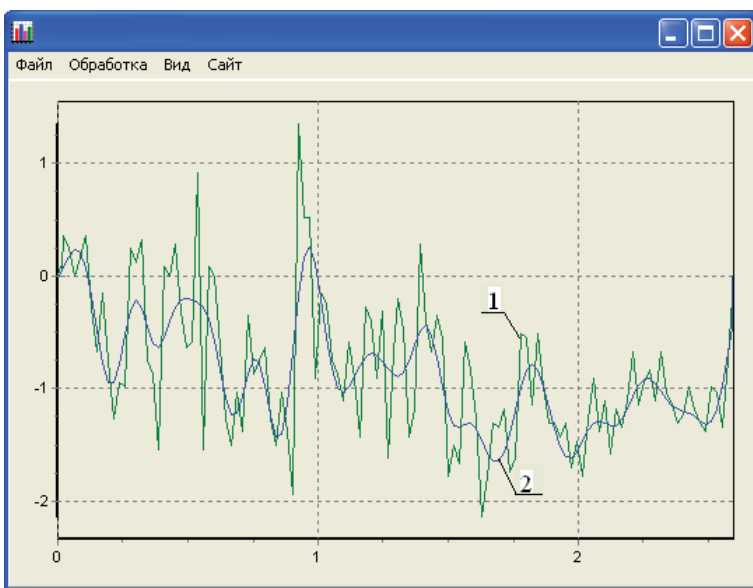


Рис. 3. Результати фільтрації експериментальних даних (по осі X час в секундах, по осі Y — прискорення в m/s^2): 1 — початкові значення; 2 — відфільтровані значення

Алгоритм визначення максимального відхилення від заданої траєкторії Δ_{max} та гальмівного шляху S_g для інших способів гальмування аналогічний вище наведеному.

Залежність гальмівного шляху S_g , як приклад, від швидкості V та умов експлуатації (сухий асфальт, мокрий асфальт, сніг) при силі тяги на гаку $P_{kr} = 0$ та екстремому гальмуванню наведено на рис. 6, 7.

Сьогодні уповільнення сучасних тракторів, зокрема і «Fendt 936 Vario», досягає іноді більше $5 m/s^2$, що підтверджується і експериментальними дослідженнями (максимальне уповільнення трактора «Fendt 936 Vario» на сухому асфальті зареєстровано $5,05 m/s^2$).

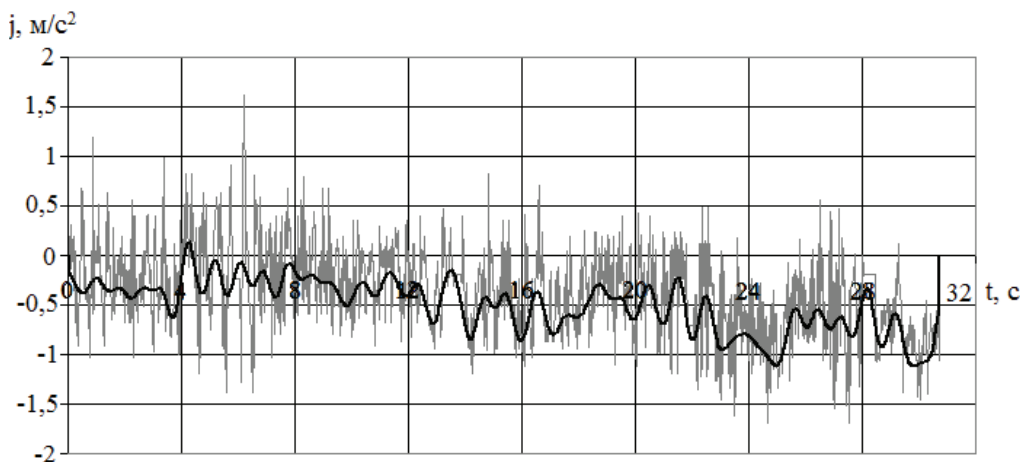


Рис. 4. Результати фільтрації вихідного сигналу акселерометра при гальмуванні зі швидкістю 40 км/год (по осі X — час t в секундах, по осі Y — прискорення j в m/s^2)

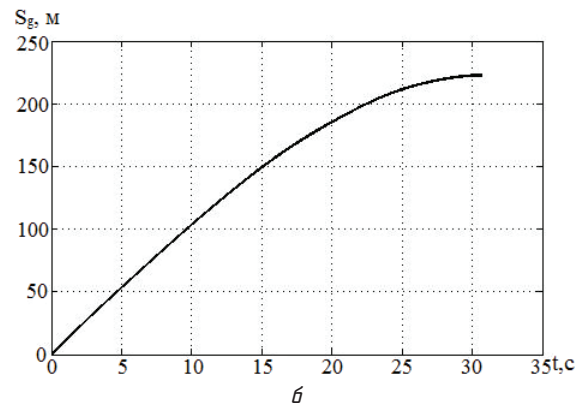
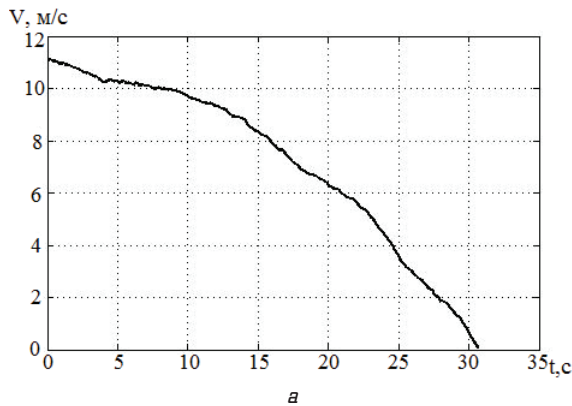


Рис. 5. Зміна швидкості V (а) та гальмівного шляху S_g , м (б) протягом часу t при гальмуванні трактора «Fendt 936 Vario» зі швидкістю 40 км/год (дорога вкрита льодом, ведучий задній міст, $P_{kr} = 0$ кН)

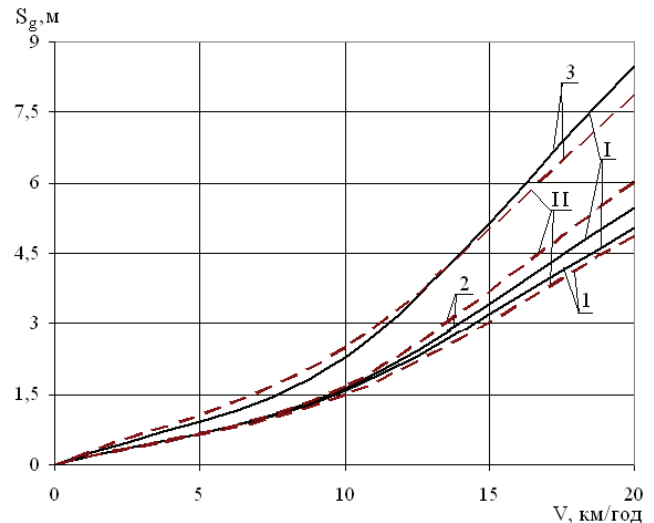
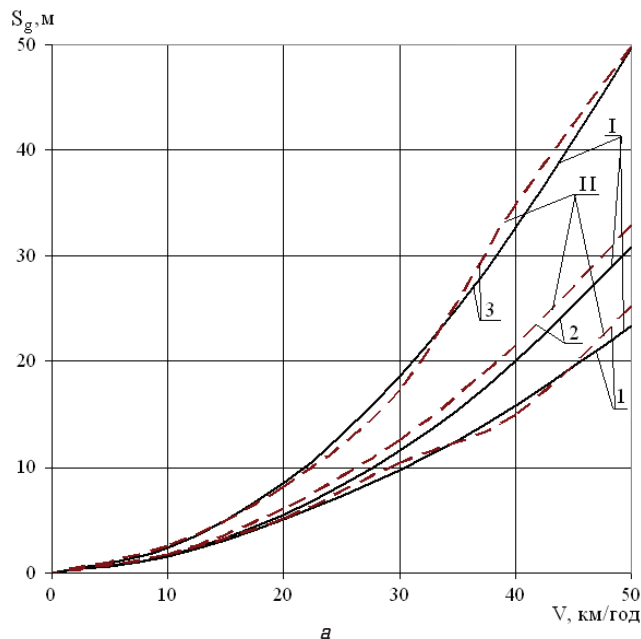


Рис. 7. Залежність гальмівного шляху S_g від швидкості V при силі тяги на гаку $P_{kr} = 0$ кН (тяговий діапазон, ведучий два мости): I — теоретичні результати; II — експериментальні результати; 1 — сухий асфальт; 2 — мокрий асфальт; 3 — сніг; при V до 20 км/год

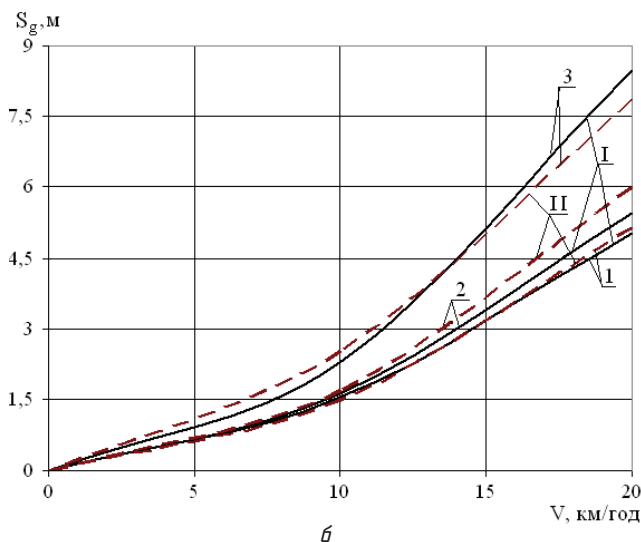


Рис. 6. Залежність гальмівного шляху S_g від швидкості V при силі тяги на гаку $P_{kr} = 0$ кН (ведучий міст задній): I — теоретичні результати; II — експериментальні результати; 1 — сухий асфальт; 2 — мокрий асфальт; 3 — сніг; а — при V до 50 км/год на транспортному діапазоні; б — при V до 20 км/год на тяговому діапазоні

Відповідно діючих норм:

- нормативне значення середнього сталого уповільнення трактора відповідно до стандартів СНД не менше $3,5 \text{ м/с}^2$ [14, 15] і $2,5 \text{ м/с}^2$ — за міжнародними стандартами [16];
- відповідно вимог Європейського Союзу та стандартів СНД [14, 15] трактор повинен мати максимальний гальмівний шлях, який розраховується по наступній формулі:

$$S_g = 0,15 \cdot V + \frac{V^2}{116}, \quad (1)$$

де V — швидкість трактора в км/год.

За результатами теоретичного та експериментального дослідження процесу гальмування трактора «Fendt 936 Vario» підтверджено, що усі діючі норми [14–16] виконуються. У разі не виконання вимог Європейського Союзу допустиму загальну масу тракторів обмежують.

4. Висновки

В результаті порівняння теоретичних результатів [13] з експериментальними [6] було встановлено:

- похибка при визначенні гальмівного шляху S_g в разі службового гальмування не перевищує 9,65 %, в разі екстреного — 9,95 %;
- похибка при визначенні відхилення від заданої траєкторії Δ_{\max} в разі службового гальмування не перевищує 9,91 %, в разі екстреного — 8,33 %.

Підвищення інтенсивності зміни параметрів регулювання $e_1(t)$, $e_2(t)$ при службовому гальмуванні (перехід з I ступеня уповільнення на IV-й) призводить до зниження гальмівного шляху та збільшення відхилення від заданої траєкторії.

В процесі службового гальмування спостерігається не суттєве підвищення гальмівного шляху (транспортний діапазон, початкова швидкість 50 км/год, сила тяги на гаку 0 кН, гальмівний шлях на сухому асфальті 137,01 м, на снігу — 142,20 м, тобто на 3,79 %) та підвищення відхилення від заданої траєкторії (транспортний діапазон, початкова швидкість 50 км/год, сила тяги на гаку 7,5 кН, відхилення від заданої траєкторії на сухому асфальті 0,16 м, на снігу — 0,20 м, тобто на 25 %) при зміні дорожніх умов у бік зменшення коефіцієнта зчеплення колеса з опорною поверхнею із-за штучного обмеження уповільнення трактора параметрами регулювання гідромашин $e_1(t)$, $e_2(t)$ та малою інтенсивністю їх зміни.

Література

1. Аш, Ж. Датчики измерительных систем [Текст]: пер. с франц.; в 2 кн. / Ж. Аш. — М.: Мир, 1992. — 480 с.
2. Inzarulfaisham, Abd. R. Development of a Vibration Measuring Unit Using a Microelectromechanical System Accelerometer for Machine Condition Monitoring [Text] / Inzarulfaisham Abd. Rahim, Muhamad Azman Miskam, Othman Sidek, Shahril Azwan Zaharudin, Mohammad Zaidi Zainol, Shukri Korakkottil Kunhi Mohd // European Journal of Scientific Research, 2009. — Vol. 35, No. 1. — P. 150–158.
3. Albarbar, A. Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study [Text] / A. Albarbar, S. Mekid, A. Starr, R. Pietruszkiewicz // Sensors. — 2008. — Vol. 8, № 2. — P. 784–799. doi:10.3390/s8020784.
4. Клец, Д. М. Разработка мобильного регистрационно-измерительного комплекса для проведения динамических испытаний колесных машин [Текст] / Д. М. Клец // Вісник Національного транспортного університету. — 2012. — № 25. — С. 234–241.
5. Шевцов, С. М. Измерительные преобразователи вибрационных процессов [Текст] / С. М. Шевцов, С. П. Ереско // Вестник БрГУ. Системы. Методы. Технологии. — 2012. — Вып. 3(7). — С. 42–49.
6. Бондаренко, А. І. Експериментальне дослідження процесу гальмування колісного трактора Fendt 936 Vario [Текст] / А. І. Бондаренко, Є. С. Пелипенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. — 2014. — № 22(1065). — С. 22–29.
7. Haykin, S. Adaptive filter theory [Text] / Simon Haykin. — Ed. 3. — Prentice-Hall, 1996. — 989 p.
8. Grewal, M. Kalman filtering theory and practice using Matlab [Text] / M. Grewal, A. Andrews. — Ed. 2. — New York: Wiley, 2001. — 410 p.
9. Синицын, И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева [Текст]: учеб. пос. / И. Н. Синицын. — М.: Университетская книга, Логос, 2006. — 640 с.
10. Badri, A. A Method to Calibrate the Measured Responses by MEMS Accelerometers [Text] / A. Badri, J. K. Sinha, A. Albarbar // Strain. — 2010. — Vol. 47. — P. 242–257. doi:10.1111/j.1475-1305.2010.00764.x.
11. Клец, Д. М. Метод повышения точности обработки данных, полученных в ходе испытаний мобильных машин, с помощью фильтра Баттерворта [Текст] / Д. М. Клец // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. — 2012. — № 60(966). — С. 98–104.
12. Глобальные технические правила № 8. Электронные системы контроля устойчивости [Текст]: ESE TRANS 180. — Введены в Глобальный регистр 26 июня 2008 года. — Женева: ООН, 2008. — 116 с. — Режим доступа: \www/URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a8r.pdf.
13. Бондаренко, А. І. Просторова математична модель процесу гальмування колісного трактора Fendt 926 Vario [Текст] / А. І. Бондаренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2011. — № 5/4(53). — С. 47–51.
14. ГОСТ 12.2.019-86. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности [Текст]. — Введен. 01.07.87. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 25 с.
15. ГОСТ 12.2.019-2005. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности [Текст]. — Введен. 01.06.2005. — М.: Изд-во стандартов, 2005. — 25 с.
16. ASAE S365. JT (SAE J 1041). Правила проверки тормозных устройств сельскохозяйственных механизмов и критерии их эффективности [Текст]. — Ростов на Дону: Перевод РН-70996, 1987. — 15 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТОРМОЖЕНИЯ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА «FENDT 936 VARIO»

Описан процесс обработки продольных и боковых ускорений, полученных в результате экспериментального исследования торможения трактора с гидрообъемно-механической трансмиссией «Fendt 936 Vario», определены значения тормозного пути и максимального отклонения от заданной траектории при служебном и экстренном торможении на дорогах с разным коэффициентом сцепления (сухой асфальт, мокрый асфальт, снег), проведен сравнительный анализ результатов экспериментального и теоретического исследования.

Ключевые слова: торможение, гидрообъемно-механическая трансмиссия, экспериментальное исследование, тормозной путь.

Самородов Вадим Борисович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобіле- і тракторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: vadimsamorodov@mail.ru.
Бондаренко Анатолій Ігорович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автомобіле- і тракторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: anatoliybon@rambler.ru.

Самородов Вадим Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобиле- и тракторостроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.

Бондаренко Анатолий Игоревич, кандидат технических наук, доцент, кафедра автомобиле- и тракторостроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.

Samorodov Vadim, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: vadimsamorodov@mail.ru.
Bondarenko Anatoly, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: anatoliybon@rambler.ru