

МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ ОПОРНОЇ ПОВЕРХНІ ПІД ЧАС РУХУ ВІЙСЬКОВОЇ ГУСЕНИЧНОЇ МАШИНИ

А. В. РУДИЙ^{1*}, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ², М. Є. БИСТРИЦЬКИЙ¹

¹ Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного, Львів, УКРАЇНА

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

*email: rasty82@ukr.net

АНОТАЦІЯ У статті розглянуто питання імітаційного моделювання впливу випадкових зовнішніх збурень на рух військової гусеничної машини, зокрема випадкову зміну параметрів покриття, по якому здійснюється рух. З використанням методу зворотнього перетворення побудовано алгоритм отримання масиву випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту. Запропонований алгоритм дозволяє підвищити адекватність імітаційної моделі збуреного руху військової гусеничної машини та може бути використаний під час досліджень, спрямованих на вдосконалення елементів трансмісії та силових установок військових гусеничних машин

Ключові слова: військова гусенична машина; імітаційне моделювання; функція розподілу; алгоритм; метод зворотніх перетворень.

MODELING OF THE EXTERNAL DISTURBANCES OF THE GROUND SURFACE DURING MILITARY TRACKING VEHICLES MOVEMENT

A. V. RUDYY¹, A. Yu. VASILIEV², M. Ye. BYSTRYTSKYI¹

¹ Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, UKRAINE

² National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE.

ABSTRACT This article is dedicated to the study of the simulation modeling of random external perturbation influence on the military tracked vehicles movement, including accidental changes of the ground surface characteristics. Despite the significant amount of work which has been done in the field of simulation modeling regarding the perturbed motion of the tracked vehicles, the modeling of the ground surface characteristics changes needs additional consideration. The purpose of this work is to construct a simulation of random changes of the ground surface characteristics during the military tracked vehicles movement.

Based on the inverse-transform method has been proposed an algorithm to obtain an array of random coefficients of resistance to the linear motion and rotation. The obtained random data has been used in the mathematical model of tracked vehicles to specify torque parameters on the driving wheels of right and left side of tracked vehicles, which are required to move on a defined path. Used as a random variables the empirical coefficients of the linear motion and rotation resistance also take into account the microprofile of ground surface that helps to adjust and at the same time to reduce the simulation complexity of tracked vehicles perturbed motion. Distribution functions of random values for the ground surface characteristics are simpler compared to the functions that describe a random change of only the ground surface microprofile. The results show that the algorithm can improve the accuracy of the simulation of tracked military vehicles perturbed motion and could be useful for studies aimed at improving the transmission elements and power units of military tracked vehicles.

Keywords: military tracked vehicle; simulation; distribution function; algorithm; the inverse-transform method.

Вступ

Одним з сучасних методів, що застосовуються під час розробки та модернізації зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) є імітаційне моделювання. Використання імітаційного моделювання дозволяє зменшити вартість та обсяги проектувальних робіт. Окремим питанням імітаційного моделювання є реалізація стохастичних збурень, які впливають на об'єкт, що моделюється, завдяки чому підвищується адекватність та точність імітаційної моделі.

Розробка гідроб'ємного механізму повороту (ГОМП) військових гусеничних машин (ВГМ) потребує моделювання криволінійного руху гусеничної машини, під час якого стає можливим

дослідити сили і моменти, які впливають на ВГМ. У даному випадку імітаційне моделювання випадкових збурень дозволяє уточнити сили та моменти, необхідні для криволінійного руху ВГМ.

Моделюванню збуреного руху гусеничних машин присвячено значну кількість робіт [1-7, 15]. Імітаційне моделювання випадкових збурень, що виникають під час руху гусеничної машини розглянуто у ряді робіт, спрямованих здебільшого на дослідження впливу мікропрофілю покриття на систему підресорювання та вібронавантаженисть. [8, 9, 13, 16, 17, 22]. У роботах [7, 11, 15] розглянуто вплив мікропрофілю покриття на силові та кінематичні параметри роботи силової установки. Робота [14] спрямована лише на моделювання

мікропрофілю поверхні без вирішення окремих технічних завдань. У представлених дослідженнях не враховано випадкової зміни характеристик опорної поверхні під час руху ВГМ. Втім відомо, що зміна характеристик опорної поверхні впливає на динамічні властивості транспортного засобу [10, 12]. Це необхідно врахувати під час моделювання руху ВГМ при вирішенні завдань дослідження параметрів трансмісії та силової установки.

Мета роботи:

Метою даної роботи є побудова імітаційної моделі випадкової зміни характеристик опорної поверхні під час руху військової гусеничної машини.

Виклад основного матеріалу

Під час руху ВГМ з лінійною швидкістю v та кутовою швидкістю ω , на неї діють реакції опору, які обумовлюють величину сили тяги, необхідної для здійснення руху (рис.1) [21].

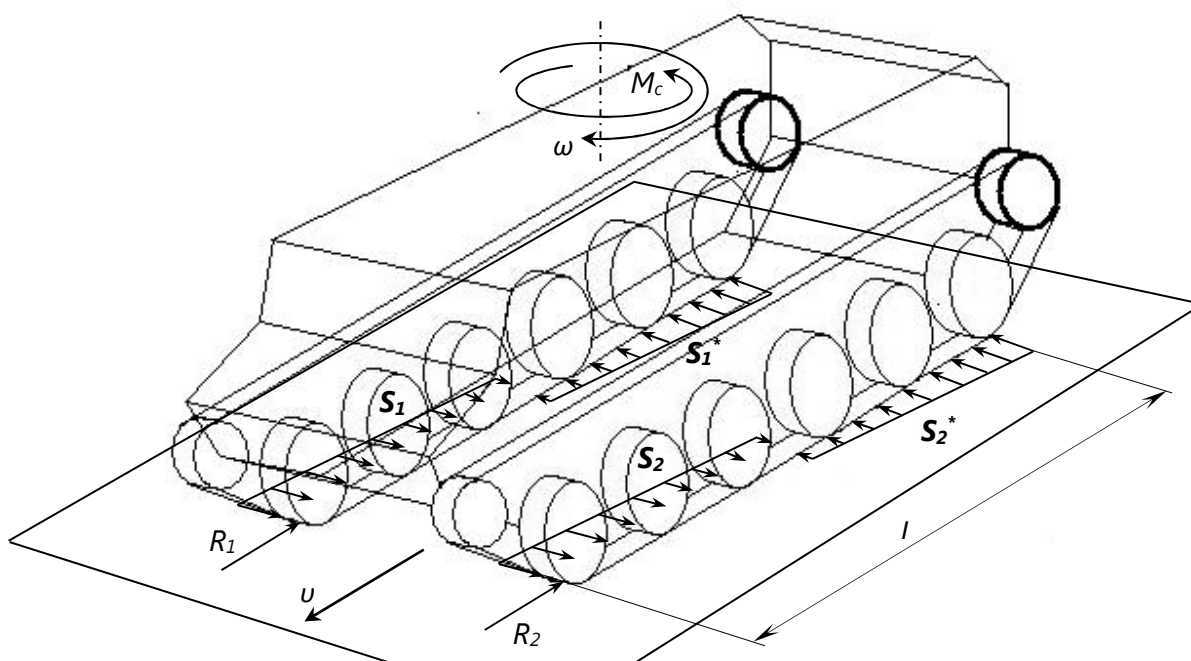


Рис. 1 – Схема реакцій опору, що здійснюють вплив на гусеничну машину під час повороту праворуч.

Реакції опору поступальному переміщенню військової гусеничної машини R_1 та R_2 , прямо залежні від коефіцієнту опору прямолінійному рухові ВГМ – f .

$$R = fN, \quad (1)$$

де N – сумарна нормальна реакція опорної поверхні.

Момент опору повороту M_c визначається величиною поперечних реакцій S_1, S_2, S_1^*, S_2^* та довжиною L повздовжньої бази ВГМ.

$$M_c = (S_1 + S_2 + S_1^* + S_2^*) \frac{L}{2}, \quad (2)$$

Поперечні реакції, у свою чергу, напряму залежать від коефіцієнту опору повороту μ [20].

$$S_1 = S_2 = S_1^* = S_2^* = \mu \frac{G}{4} \quad (3)$$

Отже, випадкова зміна коефіцієнтів опору прямолінійному рухові f та повороту μ визначає випадкову зміну реакцій R_1, R_2 та моменту опору рухові ВГМ M_c , які необхідно подолати.

З робіт [12, 21] відомо, що коефіцієнти опору прямолінійному рухові f_n та повороту μ_{max} гусеничної машини (ГМ) є величинами, отриманими експериментальним шляхом. У такому випадку немає необхідності здійснювати моделювання мікропрофілю опорної поверхні, оскільки отримання експериментальних даних не виключає впливу мікропрофілю на визначення емпіричних коефіцієнтів. Таким чином, під час імітаційного моделювання впливу зовнішніх збурень на необхідні для руху сили та моменти є достатнім здійснити

моделювання випадкової зміни параметрів опорної поверхні.

Побудуємо алгоритм отримання масиву випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту (рис.2)

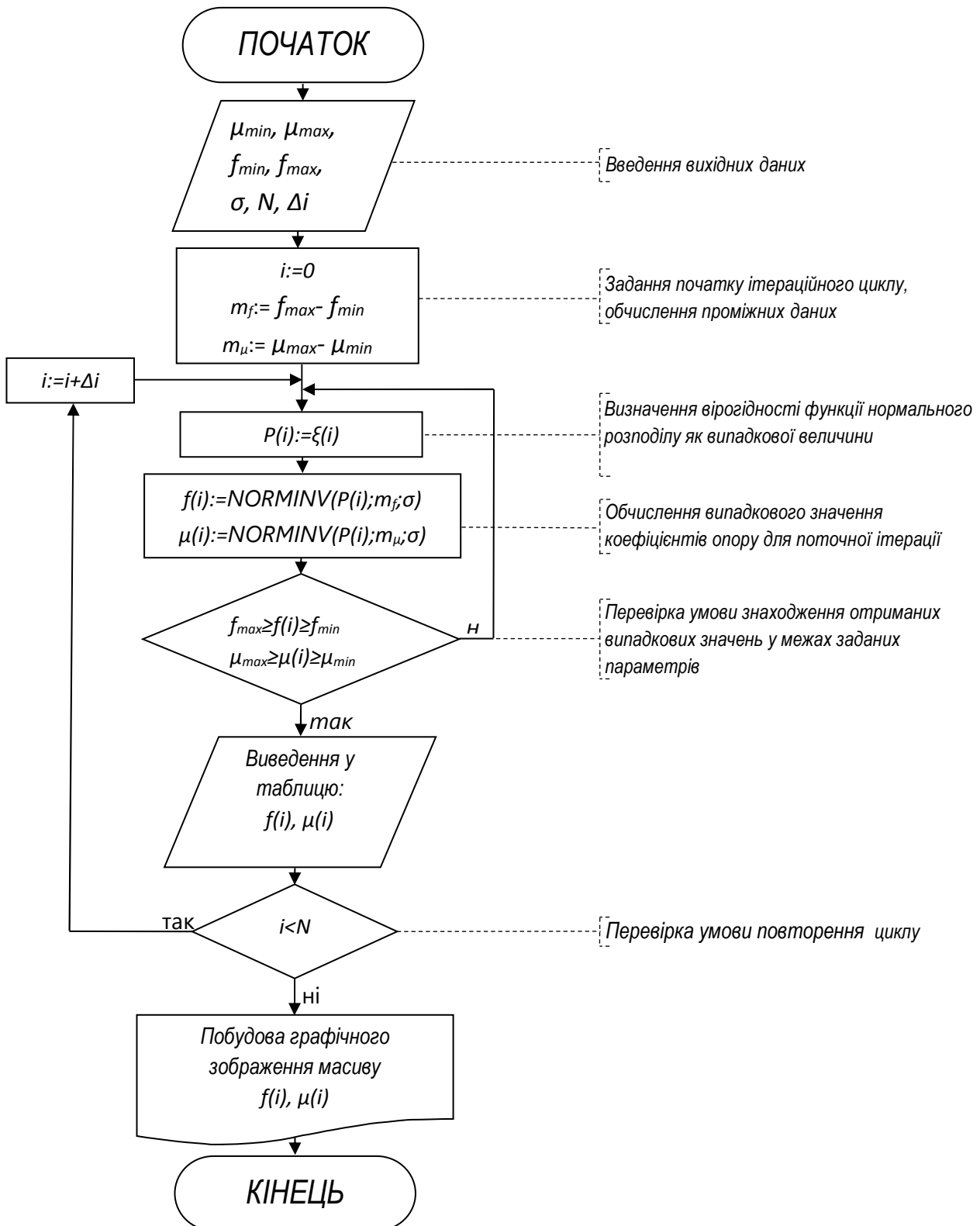


Рис. 2 – Алгоритм отримання масиву випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту

Обробка численних експериментальних даних вказує на те, що зміна коефіцієнтів опору прямолінійному рухові f_n та повороту μ_{max} підпорядковується закону нормального розподілу [20], тобто

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x - m_x}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

де x – коефіцієнт опору f_n або μ_{max} .

У такому випадку функція щільності розподілу вірогідності коефіцієнтів опору прямолінійному рухові f_n та повороту μ_{max} повністю визначається середнім квадратичним відхиленням σ та математичним очікуванням m_x . Значення їх наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристика функцій розподілу коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту ВГМ

Дорожно-грунтові умови	Математичне очікування m_f	Математичне очікування m_μ	Середньо-квадратичне відхилення σ
Дороги з твердим покриттям	0,035 – 0,045	0,3 - 0,5	0,0055
Гравійні дороги	0,05 – 0,055	0,8	0,007
Укатана ґрунтова дорога	0,07	0,8	0,009
Розбита ґрунтова дорога	0,0675	0,8	0,015
Бездоріжжя	0,06 – 0,25	0,6 – 0,96	0,0225

Значення математичного очікування m_f та m_μ таблицьних значень відповідного коефіцієнту для являють собою середнє арифметичне значення обраного типу покриття. Залежність коефіцієнтів верхньої та нижньої меж опору прямолінійному рухові та повороту від типу ґрунту наведено у таблиці 2. [12, 21, 22].

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнтів опору від характеру опорної поверхні.

Дорожно-грунтові умови	Коефіцієнт опору прямолінійному руху f_n	Коефіцієнт опору повороту μ_{max}
Асфальтобетонна дорога категорії 1	0,035 – 0,045	0,4 – 0,5
Асфальтобетонна дорога категорій 2, 3	0,04 – 0,05	0,4 – 0,5
Суха гладка бруківка	0,045 – 0,055	0,75 – 0,85
Задовільна бруківка	0,05 – 0,06	0,75 – 0,85
Суха профільована ґрунтова дорога	0,06 – 0,08	0,7 – 0,9
Суха розбита ґрунтова дорога	0,065 – 0,07	0,7 – 0,9
Ґрунтова дорога у період розпутиці	0,1 – 0,15	0,3 – 0,5
Засніжена укатана дорога	0,06 – 0,08	0,12 – 0,22
Обледеніла снігова дорога	0,05 – 0,1	0,25 – 0,35
Льодова дорога	0,03 – 0,04	0,45 – 0,55
Сухий дернистий ґрунт	0,05 – 0,07	0,7 - 0,9
Сухий піщаний ґрунт	0,1 – 0,25	0,8 – 0,9
Вологий піщаний ґрунт	0,08 – 0,1	0,9 – 1,1
Сухий дернистий суглинок	0,07 – 0,09	0,8 – 1,0
Сухий пилувидний суглинок	0,06 – 0,08	0,7 - 0,9
Сухий скошений луг	0,08 – 1,0	0,7 - 0,9
Вологий скошений луг	0,1 – 0,16	0,9 – 1,1
Стерня	0,06 – 0,08	0,55 – 0,65
Пахота	0,1 – 0,16	0,6 – 0,8
Снігова цілина	0,15 – 0,25	0,5 – 0,7
Заболочена місцевість	0,2 – 0,3	0,85 – 0,9

Для отримання масиву випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові f_n та повороту μ_{max} використаємо метод зворотнього перетворення (перетворення Н.В. Смирнова) [19], для чого отримаємо інверсію інтегральної функції спектральної щільності, або т.з. функцію розподілу

$$F(P) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{P - m_x}{\sigma\sqrt{2}}\right), \quad (5)$$

де $t = \frac{P - m_x}{\sigma}$, x – коефіцієнт опору f_n або μ_{max} .

Графіки функцій розподілу коефіцієнтів опору представлені на рис. 3 та рис. 4

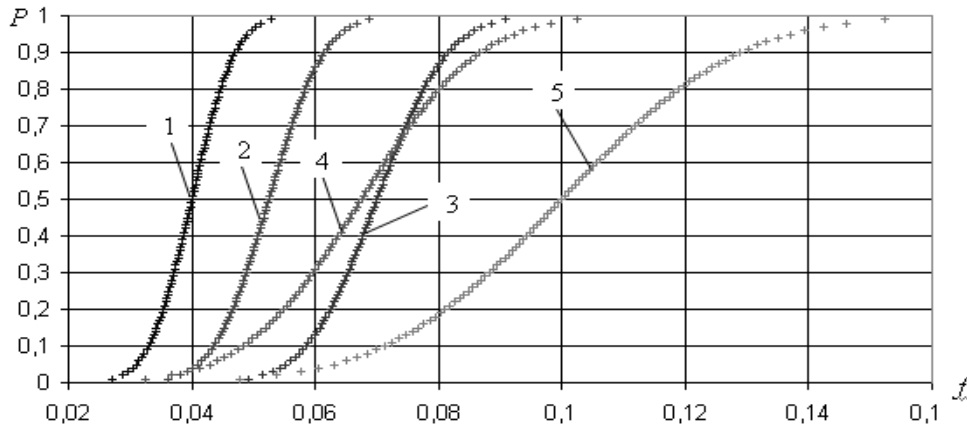


Рис. 3 – Функція розподілу коефіцієнтів опору прямолінійному рухові для різних типів поверхонь:

1 – дороги з твердим покриттям, 2 – гравійні дороги, 3 – укатані ґрунтові дороги, 4 – розбиті ґрунтові дороги, 5 - бездоріжжя

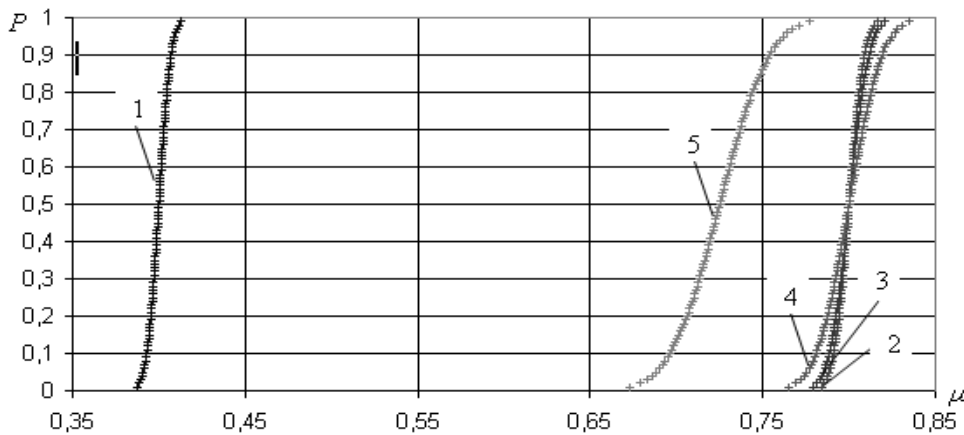


Рис. 4 – Функція розподілу коефіцієнтів опору повороту для різних типів поверхонь:

1 – дороги з твердим покриттям, 2 – гравійні дороги, 3 – укатані ґрунтові дороги, 4 – розбиті ґрунтові дороги, 5 - бездоріжжя

Маючи генератор масиву випадкових чисел за рівномірним розподілом $\xi(i)$ у проміжку 0..1, модифікуємо його роботу шляхом використання випадкових значень у якості показника вірогідності під час побудови оберненої функції нормального розподілу. Для побудови масиву випадкових

значень коефіцієнтів опору було використано функцію NORMINV(P, m_x, σ) програмного середовища Excel.

Оскільки згенеровані значення коефіцієнтів опору у ряді випадків можуть перевищувати визначені табличними показниками межі, алгоритм передбачає повторне генерування випадкового значення $\zeta(i)$ до тих пір, поки показники не відповідатимуть умовам:

$$f_{max} \geq f(i) \geq f_{min}$$

$$\mu_{max} \geq \mu(i) \geq \mu_{min}$$

Обговорення результатів

З використанням алгоритму, зображеного на рис.2, у якості прикладу, за допомогою програмного середовища Excel

було побудовано масиви випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові f_n та повороту μ_{max} для сухого піщаного ґрунту на 1000 ітерацій (рис. 5 та рис. 6.)

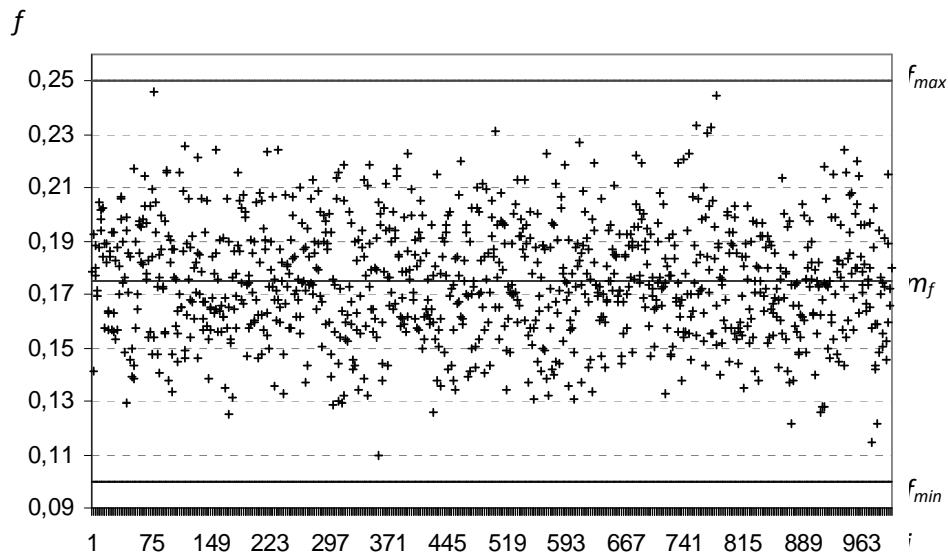


Рис. 5 – Масив випадкових даних для коефіцієнта опору прямолінійному рухові f (сухий піщаний ґрунт)

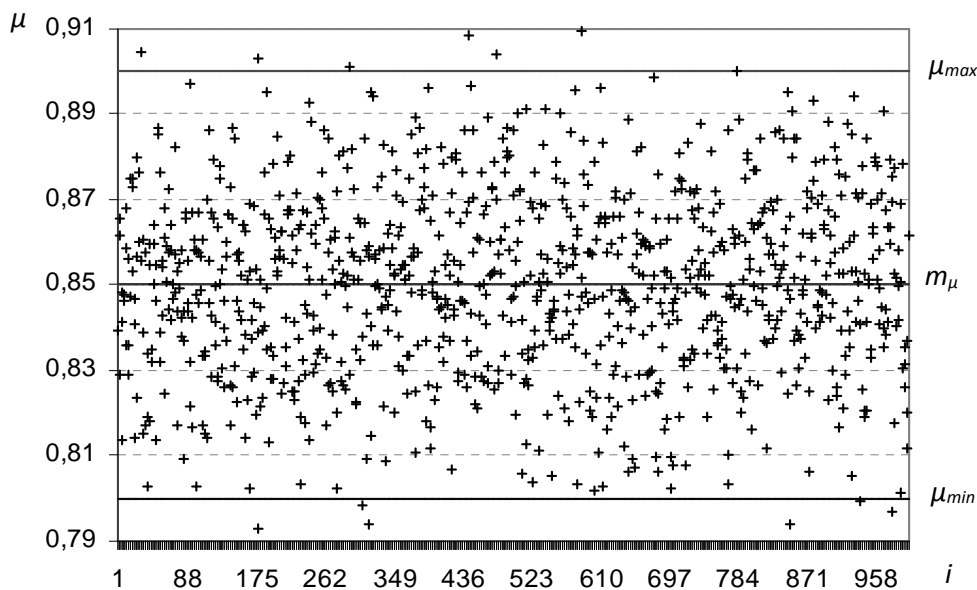


Рис. 6 – Масив випадкових даних для коефіцієнта опору повороту μ (сухий піщаний ґрунт)

Отримуючи для кожної наступної ітерації нове випадкове значення можливо змодельовати випадкову зміну параметрів покриття, по якому здійснює рух гусенична машина. Це дає змогу уточнити існуючі імітаційні моделі збуреного руху ВГМ. Під час використання даного алгоритму для моделювання сил та моментів, необхідних для криволінійного руху ВГМ, з метою підвищення адекватності імітаційної моделі було паралельно змодельовано коефіцієнти опору для правого та лівого борту окремо, що, з

використанням математичної моделі [12], дало змогу отримати значення крутних моментів $M1$ та $M2$ на ведучих колесах необхідних для руху ВГМ вагою 42т. по сухому піщаному ґрунту з швидкістю 25 км/г (рис. 7 – 9), та порівняти ці дані з результатами моделювання $M1(f=const)$, $M2(f=const)$, коли постійне значення показників коефіцієнтів опору f та μ прийнято як середнє арифметичне табличних значень цих коефіцієнтів.

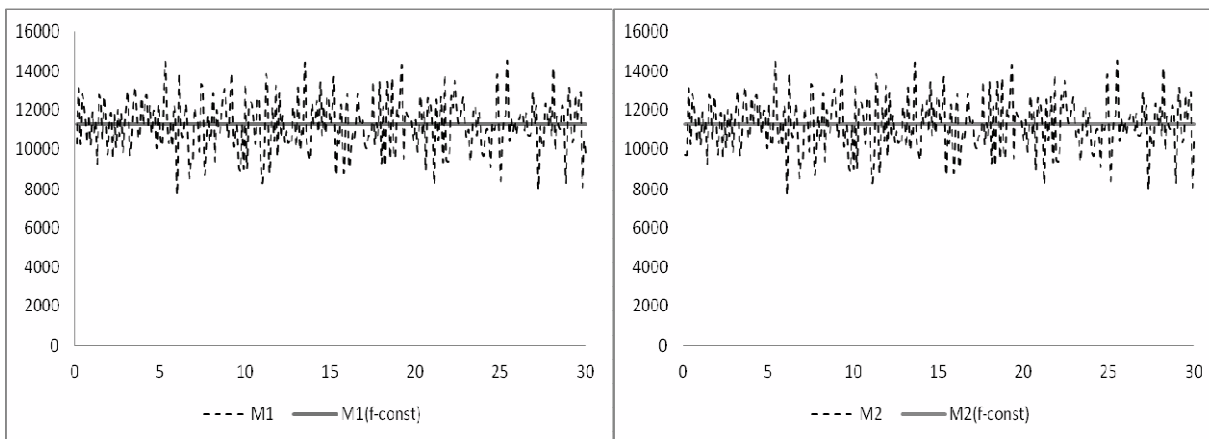


Рис. 7 – Результати імітаційного моделювання крутних моментів на ведучих колесах, необхідних для прямолінійного руху ВГМ вагою 42 т. по сухому піщаному ґрунту.

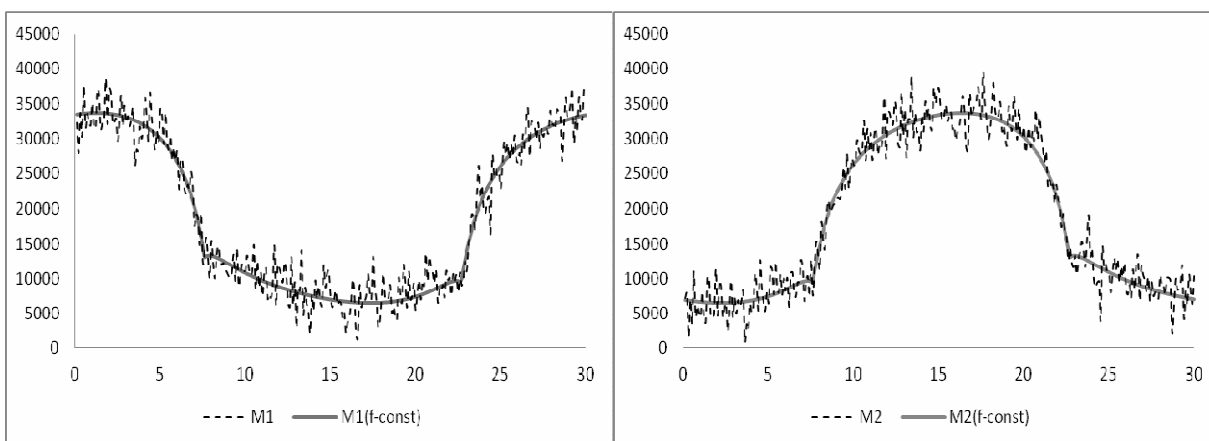


Рис. 8 – Результати імітаційного моделювання крутних моментів на ведучих колесах, необхідних для руху «змієюю» ВГМ вагою 42 т. по сухому піщаному ґрунту.

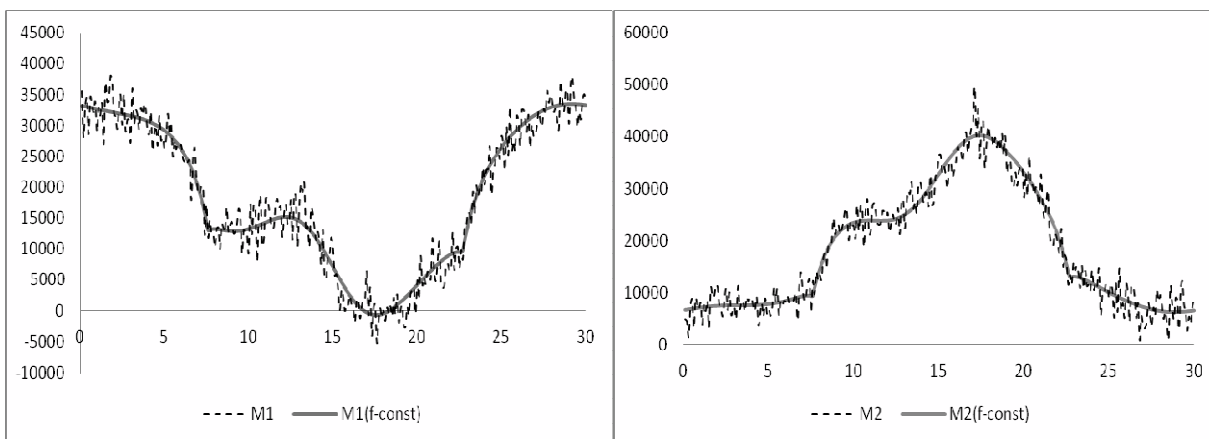


Рис. 9 – Результати імітаційного моделювання крутних моментів на ведучих колесах, необхідних для руху «змієюю» ВГМ вагою 42 т. по сухому піщаному ґрунту на схилі 10°.

Порівняння показників крутних моментів, отриманих під час математичного та імітаційного моделювання (рис. 10) дає змогу визначити, що різниця між ними під час збуреного криволінійного

руху на косогорі у окремих випадках сягає 7кН·м, що свідчить про підвищення адекватності імітаційної моделі порівняно з математичною.

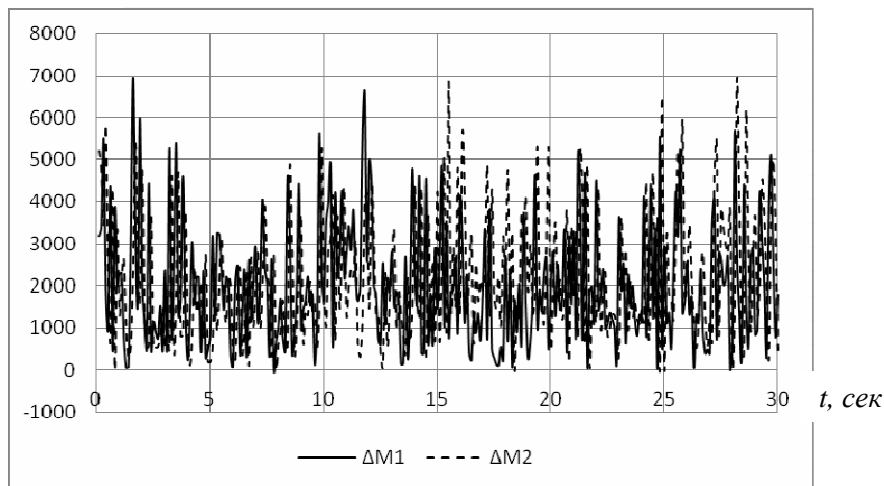
$M, Нм$ 

Рис. 10 – Різниця значень крутних моментів на ведучих колесах ВГМ отриманих під час імітаційного та математичного моделювання.

Висновки:

Існуючі імітаційні моделі зовнішніх збурень, діючих на ВГМ під час руху, спрямовані на моделювання лише мікропрофілю поверхні, не враховуючи випадкових змін параметрів покриття. Такий підхід є прийнятним під час дослідження коливальних корпусу машини, але, водночас, є недостатньо точним у випадку дослідження впливу зовнішніх збурень на силові та кінематичні параметри трансмісії та силової установки.

У роботі запропоновано алгоритм побудови масиву нормально розподілених випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту ВГМ, значення яких використано під час імітаційного моделювання руху ВГМ.

Запропонований алгоритм підвищує адекватність імітаційної моделі збуреного руху ВГМ, не впливаючи на її складність, завдяки урахуванню коефіцієнтів опору, значення яких враховують параметри мікропрофілю опорної поверхні.

Список літератури

- 1 **Al-Milli, S.** Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain / **S. Al-Milli, L. Seneviratne, K. Althoefer.** // *Journal of Terramechanics.* – 2010. – №3. – P. 151–160. – doi:10.1016/j.jterra.2010.02.001.
- 2 **Dawkins, J.** Evaluation of fractal terrain model for vehicle dynamic simulations / **J. Dawkins, D. Bevely, R. Jackson.** // *Journal of Terramechanics.* – 2012. – №6. – P. 299–307. – doi:10.1016/j.jterra.2012.10.003.
- 3 Predicting mobility performance of a small, lightweight track system using the computer-aided method NTVPM / **J. Y. Wong, C. Senatore, P. Jayakumar, K. Iagnemma.** // *Journal of Terramechanics.* – 2015. – №61. – P. 23–32. – doi:10.1016/0022-4898(94)90010-8.
- 4 **Monga, M.** Real-time simulation of dynamic vehicle models using a high-performance reconfigurable platform / **M. Monga, D. Roggow, M. Karkee and etc.** // *Microprocessors and Microsystems.* – 2015. – №8. – P. 720–740. – doi:10.1016/j.micpro.2015.08.014.
- 5 **Rubinstein, D.** A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles / **D. Rubinstein, R. Hitron.** // *Journal of Terramechanics.* – 2004. – №2. – P. 163–173. – doi:10.1016/j.jterra.2004.02.004.
- 6 **Rabbani, M.** Simulation for Vertical Dynamic Loading Forces on Track Rollers of the Half-tracked Tractor Based on Nonlinear Voigt's Model / **M. Rabbani, S. Takeoka, M. Mitsuoka and etc.** // *Engineering in Agriculture, Environment and Food.* – 2010. – №4. – P. 119–126. – doi:10.1016/S1881-8366(10)80003-5.
- 7 **Александров, Е. Е.** Имитационное моделирование возмущенного движения гусеничной машины с гидробъемным механизмом поворота / **Е. Е. Александров, Д. Е. Хаустов.** // *Вісник НТУ «ХПІ» «Транспортне машинобудування».* – 2005. – №37. – С. 19–28.
- 8 **Белецкий, А. В.** Математическое и имитационное моделирование профиля дорожного покрытия [Электронный ресурс] / **А. В. Белецкий, С. С. Рекунов.** // *Интернет-журнал "НАУКОВЕДЕНИЕ".* – 2014. – Вып. 5(24). – Режим доступа до ресурсу: <http://naukovedenie.ru>.
- 9 **Бровцин, В. М.** Моделирование микропрофиля поверхности полей и дорог / **В. М. Бровцин.** // *Сборник научных трудов ИАЭП.* – 2015. – №86. – С. 59–68.
- 10 **Высоцкий, М. С.** Основы проектирования модульных магистральных автопоездов / **М. С. Высоцкий, С. И. Кочетов, С. В. Харитончик.** – Минск: "Беларуская навука". – 2011. – 392 с.
- 11 **Александров, Е. Е.** Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / **Е. Е. Александров, Д. О. Волонцевич, В. Б. Самородов та ін.** – Харьков: ХНАДУ. – 2001. – 640 с.
- 12 **Исаков, П. П.** Теория и конструкция танков / **П. П. Исаков.** – Москва: "Машиностроение". – 1987. – 196 с.
- 13 **Лелиовский, К. Я.** Исследование вибраций трансмиссии при движении автомобиля по дорогам различного микропрофиля / **К. Я. Лелиовский, В. С. Макаров.** // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева.* – 2013. – №4. – С. 98 – 103.

- 14 **Мазманишвили, А. С.** Построение случайных поверхностей движения объектов бронетанковой техники / **А. С. Мазманишвили, Т. Е. Александрова** // *Системы озброєння і військова техніка*. – 2012. – №1. – С. 68-71.
- 15 **Марченко, Н. А.** Имитационное моделирование движения транспортного средства по пересеченной местности / **Н. А. Марченко**. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2004. – №1. – С. 87-89.
- 16 **Сергиенко, А. Н.** Методика описания неровностей профиля дороги при моделировании подвески автомобиля с рекуператором энергии колебаний / **А. Н. Сергиенко, Н. Г. Медведев, Б. Г. Любарский та ін.** // *Вісник НТУ "ХПИ"*. – 2013. – №37. – С. 185-192.
- 17 **Ндикумана, Э.** Разработка метода регистрации микропрофиля дороги с целью исследования плавности хода автомобиля: дис. канд. техн. наук: 05.05.03 / **Ндикумана Эдуард** – Москва. – 2000. – 150 с.
- 18 **Рудий, А. В.** Математична модель руху гусеничної машини на основі рівнянь Гіббса-Аппеля / **А. В. Рудий, Д. В. Рудавський** // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. – 2015. – №3. – С. 113-117.
- 19 **Королюк В. С.** Справочник по теории вероятностей и математической статистике. / **В. С. Королюк, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин**. – Москва: "Наука". – 1985. – 640 с.
- 20 **Фролов, К. В.** Колёсные и гусеничные машины / **К. В. Фролов**. – Москва: "Машиностроение". – 1997. – 687 с.
- 21 **Чобиток, В. А.** Теория движения танков и БМП / **В. А. Чобиток**. – Москва: Военное издательство. – 1984. – 264 с.
- 22 **Шишанов, С. М.** Выбор рациональных параметров системы поддрессирования быстроходных гусеничных машин : дис. канд. техн. наук : 05.05.03 / **Шишанов Сергей Маркович** – Москва. – 2015. – 185 с.
- Rollers of the Half-tracked Tractor Based on Nonlinear Voigt's Model. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2010, **4**, 119-126, doi:10.1016/S1881-8366(10)80003-5
7. **Aleksandrov, E. E., Khaustov, D. E.** Imitatsionnoe modelirovaniye vozmuschennogo dvizheniya gusenichnoj mashiny s gidroob'yemnym mekhanizmom povorota [Simulation of the tracked vehicle perturbed motion with hydrostatic turning mechanism], *Visnyk NTU «KhPI» «Transportne mashynobuduvannia»*, 2005, **37**, 19-28.
8. **Beletskyj, A. V., Rekunov, S. S.** Matematicheskoe i imitatsionnoe modelirovaniye profilya dorozhnogo pokrytiya [Mathematical modeling and simulation of road surface profile]. *Internet-journal "NAUKOVEDENYE"*, 2014, **5(24)**, [web] <http://naukovedenie.ru>.
9. **Brovtsin, V. M.** Modelirovaniye mikroprofilya poverkhnosti polej i dorog [Modeling of surface microprofile of fields and roads]. *Sbornyk nauchnykh trudov YAEF*, 2015, **86**, 59-68.
10. **Vysotskyj, M. S., Kochetov, S. Y., Kharytonchyk, S. V.** Osnovy proektirovaniya modul'nykh magistral'nykh avtopoyezdov [Basics of modular mainline trains design]. Minsk: "Belarusskaya navuka", 2011, 392 p.
11. **Aleksandrov, E. E., Volontsevich, D. O., Samorodov, V. B. etc.** Dinamika transportno-tyagovykh kolesnykh i gusenichnykh mashin. [Dynamics of transport-hauling wheeled and caterpillar machines]. *Khar'kov: KhNADU*, 2001, 640 p.
12. **Isakov, P. P.** Teoriya i konstruktziya tankov [Theory and design of tanks]. Moscow: "Mashinostroyeniye", 1987, 196 p.
13. **Lelyovskyj, K. Ya., Makarov, V. S.** Issledovaniye vibratsij transmissii pri dvizhenii avtomobilya po dorogam razlichnogo mikroprofilya [Studying the transmission vibration during the vehicle motion upon the roads of various microprofile]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseyeva*, 2013, **4**, 98-103.
14. **Mazmanyshvyly, A. S., Aleksandrova, T. E.** Postroyeniye sluchajnykh poverkhnostej dvizheniya ob'yektov bronetankovoj tekhniki [Construction of casual surfaces of objects motion of armoured technique]. *Systemy ozbroyennya i vijs'kova tekhnika*, 2012, **1**, 68-71.
15. **Marchenko, N. A.** Imytatsionnoye modelirovaniye dvizheniya transportnogo sredstva po peresechennoj mestnosti [Simulation of the vehicle on rough terrain]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniyya*, 2004, **1**, 87-89.
16. **Serhyenko, A. N., Medvedev, N. H., Liubarskyj, B. H. etc.** Metodika opisaniya nerovnostej profilya dorogi pri modelirovanii podveski avtomobilya s rekuperatorom energii kolebanij [Method of road roughness description in the simulation car suspension with heat recovery energy vibrations]. *Visnyk NTU "KhPI"*, 2013, **37**, 185-192.
17. **Ndikumana, E.** Razrabotka metoda registratsii mikroprofilya dorogi s tsel'yu issledovaniya plavnosti khoda avtomobilya: Dissert. kand. tekhn. nauk: 05.05.03 [Development of a method of road microprofile registration

Bibliography (transliterated)

1. **Al-Milli, S., Seneviratne, L. D., Althoefer, K.** Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain. *Journal of Terramechanics*, 2010, **47(3)**, 151-160, doi:10.1016/j.jterra.2010.02.001.
2. **Dawkins, J., Bevly, D., Jackson, R.** Evaluation of fractal terrain model for vehicle dynamic simulations. *Journal of Terramechanics*, 2012, **6**, 299-307, doi:10.1016/j.jterra.2012.10.003.
3. **Wong, J. Y., Senatore, C., Jayakumar, P., Iagnemma, K.** Predicting mobility performance of a small, lightweight track system using the computer-aided method NTVPM. *Journal of Terramechanics*, 2015, **61**, 23-32, doi:10.1016/0022-4898(94)90010-8.
4. **Monga, M., Roggow, D., Karkee, M. and etc.** Real-time simulation of dynamic vehicle models using a high-performance reconfigurable platform. *Microprocessors and Microsystems*, 2015, **8**, 720-740. doi:10.1016/j.micpro.2015.08.014
5. **Rubinstein, D., R. Hitron.** A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles. *Journal of Terramechanics*, 2004, **2**, 163-173, doi:10.1016/j.jterra.2004.02.004
6. **Rabbani, M. Takeoka, S. Mitsuoka M. and etc.** Simulation for Vertical Dynamic Loading Forces on Track

- to explore the smooth course of the car]. Moskva, 2000, 150 p.
18. **Rudyy, A. V., Rudavs'kyj, D. V.** Matematychna model' rukhu husenychnoi mashyny na osnovi rivnian' Hibbsa-Appelia [Mathematical model of tracked vehicles motion based on Gibbs-Appell equation]. *Suchasni informatsijni tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 2015, 3, 113-117.
 19. **Korolyuk, V. S., Portenko, N. I., Skorokhod, A. V., Turbin, A. F.** Spravochnik po teorii veroyatnostej i matematicheskoy statistike [Handbook of probability theory and mathematical statistics], Moscow: "Nauka", 1985, 640 p.
 20. **Frolov, K. V.** Koliosnyye i gusenichnyye mashyny [Wheel and caterpillar machines]. Moscow: "Mashynostroenye", 1997, 687 p.
 21. **Chobytok, V. A.** Teoriya dvizheniya tankov i BMP [Theory movement of tanks and combat infantry machine]. Moscow: Voennoe izdatel'stvo, 1984, 264 p.
 22. **Shyshanov, S. M.** Vybory ratsional'nykh parametrov sistemy podressorivaniya bystrokhodnykh gusenichnykh mashin: Dissert. kand. tekhn. nauk: 05.05.03 [The choice of rational parameters of the suspension system of high-speed tracked vehicles]. Moscow, 2015, 185 p.

Відомості про авторів (About authors)

Рудий Андрій Володимирович – Національна академія сухопутних військ ім. Гетьмана П.Сагайдачного, ад'юнкт; м. Львів, Україна; e-mail: rasty82@ukr.net

Andriy Rudiy – Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, adjunct; Lviv, Ukraine; e-mail: rasty82@ukr.net

Васильєв Антон Юрійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; e-mail: avasiliev@tmm-sapr.org

Anton Vasiliev – Ph.D., Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant professor; Kharkov, Ukraine; e-mail: avasiliev@tmm-sapr.org.

Бистрицький Максим Євгенович – кандидат фізико-математичних наук, Національна академія сухопутних військ ім. Гетьмана П.Сагайдачного, курсовий офіцер курсів перепідготовки та підвищення кваліфікації; м. Львів, Україна; e-mail: bystrytsky@gmail.com.

Maksym Bystrytsky – Ph.D., Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, course officer of retraining and advanced training courses; Lviv, Ukraine; e-mail: bystrytsky@gmail.com

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Рудий, А. В. Моделирование внешних возмущений опорной поверхности под час руху військової гусеничної машини / **А. В. Рудий, А. Ю. Васильєв, М. Є. Бистрицький** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 113-122. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.17.

Please cite this article as:

Rudiy, A., Vasiliev, A., Bystrytsky, M. Modeling of the external disturbances of the ground surface during military tracking vehicles movement. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 18 (1190), 113-122, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.17.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Рудой, А. В. Моделирование внешних возмущений опорной поверхности во время движения военной гусеничной машины / **А. В. Рудой, А. Ю. Васильєв, М. Е. Бистрицький** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 113-122. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.17.

АННОТАЦИЯ В статье рассмотрен вопрос имитационного моделирования влияния случайных внешних возмущений на движение военной гусеничной машины, в частности случайное изменение характеристик опорной поверхности по которой совершается движение. С использованием метода обратного преобразования построен алгоритм получения массива случайных значений коэффициентов сопротивления прямолинейному движению и повороту. Предложенный алгоритм позволяет уточнить имитационную модель возмущенного движения военной гусеничной машины и может быть использован во время исследований, направленных на усовершенствование элементов трансмиссий и силовых установок военных гусеничных машин

Ключевые слова: военная гусеничная машина; имитационное моделирование; функция распределения; алгоритм; метод обратного преобразования.

Надійшла (received) 16.05.2016