

Є.І. КАЛІНІН, О.Ю. РЕБРОВ, В.М. КОЛОДНЕНКО

ФОРМУВАННЯ СЛІДКУЮЧОГО РУХУ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА В УМОВАХ ЙОГО АВТОМАТИЧНОГО ВОДІННЯ

В роботі проаналізовано вплив конструктивних параметрів колісних та гусеничних машин на можливість їх представлення в якості систем автоматичного керування. Складена математична модель динаміки самохідної машини по опорній поверхні. Аналіз результатів досліджень показує, що відведення коліс, що характерне переважно для транспортних машин, призводить до досить складної математичної моделі об'єкта управління. Фізично це пояснюється розбіжністю напрямків сили тяги та вектору швидкості. Аналогічний результат виходить у тому випадку, коли досліджується гусенична машина. Але фізична причина появи у схемі ідеальної форсуючої ланки тут, звичайно, інша: під дією тягового опору зміщується назад відносно опорної точки миттєвий полюс повороту. Своєрідність самохідної машини як об'єкта, що виконує рух стеження, виявляється в тому, що в структурну схему додається ще одна інтегруюча ланка. Тому в одноконтурній структурній схемі системи автоматичного водіння завжди присутні мінімум дві послідовно з'єднані інтегруючі ланки.

Ключові слова: трактор, самохідна машина, система автоматичного водіння, динаміка, слідкуючий рух.

E. KALININ, O. REBROV, V. KOLODNENKO

FORMATION OF THE FOLLOWING MOVEMENT OF A WHEEL TRACTOR UNDER THE CONDITIONS OF ITS AUTOMATIC DRIVING

The paper analyzes the influence of the design parameters of wheeled and tracked machines on the possibility of their presentation as automatic control systems. A mathematical model of the dynamics of a self-propelled machine on a support surface is developed. The analysis of the research results shows that wheel deflection, which is characteristic mainly for transport vehicles, leads to a rather complex mathematical model of the control object. Physically, this is explained by the divergence of the directions of the traction force and the velocity vector. A similar result is obtained in the case when a tracked machine is investigated. But the physical reason for the appearance of an ideal forcing link in the scheme here is, of course, different: under the action of traction resistance, the instantaneous pole of rotation shifts back relative to the reference point. The peculiarity of a self-propelled machine as an object performing a tracking movement is revealed in the fact that another integrating link is added to the structural diagram. Therefore, in the single-circuit structural diagram of the automatic driving system, there are always at least two serially connected integrating links.

Key words: tractor, self-propelled machine, automatic driving system, dynamics, following movement.

Вступ.

Приєднання автомату-водія до самохідної машини дає якісно новий підхід, що називається «система автоматичного водіння» (САВ).

Функціональна схема САВ відображає загальний принцип її побудови. В цю схему повинні входити такі елементи, які були б функціональним еквівалентом системи «водій-машина». Вивчення системи «водій-самохідна машина» має очевидний практичний сенс для автоматизації водіння, яка в такому плані виступає як одна з задач технічної біоніки.

В задачах управління самохідними машинами вивчення так званого «ручного» керування нерідко слугує джерелом направляючих ідей для автоматизації. В процесах ручного управління встановлюється гнучка координація рухів, що відображають мету управління. При водінні самохідної машини гнучкість і пристосованість подібних актів повинні бути особливо великими через змінність властивостей системи «машина-опорна поверхня». Першим, хто звернув на це увагу, був, скоріш за все, Н. Вінер, назвавши свій метод ручного керування автомобілем «керуванням за допомогою «інформаційного» зворотного зв'язку». Відомо, що в подальшому за таким принципом були виконані найбільш досконалі системи автоматичного управління, названі системами, що самоналаштовуються.

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

Мета системи автоматичного водіння – забезпечити найкращий збіг траєкторії опорної точки машини із заданою опорною траєкторією за найменшої інтенсивності керуючих впливів [1 – 4].

Виходячи з цієї мети, система автоматичного водіння повинна трактуватися як своєрідна система стеження, оскільки рух опорної точки є рухом стеження. Оскільки в теорії трактора і автомобіля [5, 6, 8] не розглядався рух машин, як рух стеження (при ручному керуванні це, очевидно, не мало сенсу), то цікавим є вивчення руху колісного трактора з точки зору його функціонування з системою автоматичного водіння [7, 8, 10].

При цьому, самохідна машина виступає тут як об'єкт управління у вигляді твердого керованого тіла, що виконує приписаний рух на площині шляхом цілеспрямованої зміни його орієнтації відносно опорної траєкторії. Водіння тлумачиться в рамках теоретичної механіки як накладання на машину нежорсткої в'язі з опорною траєкторією, а в рамках теорії автоматичного керування – як запровадження негативного зворотного зв'язку між виходом та входом машини (об'єктом керування) [9, 10].

Мета та постановка задачі.

Метою даної роботи є формування принципів автоматичного водіння трактора як системи стеження з метою подальшого аналізу функціонування останньої.

Математична модель колісної машини як об'єкту управління.

Самохідна машина, що виконує рух стеження, являє собою об'єкт з двома взаємопов'язаними вихідними величинами. Першою вихідною величиною є поперечне (бічне) зміщення $x_0 \sim \varepsilon$, що характеризує відстань між опорною точкою O_1 і опорною траєкторією (рис. 1).

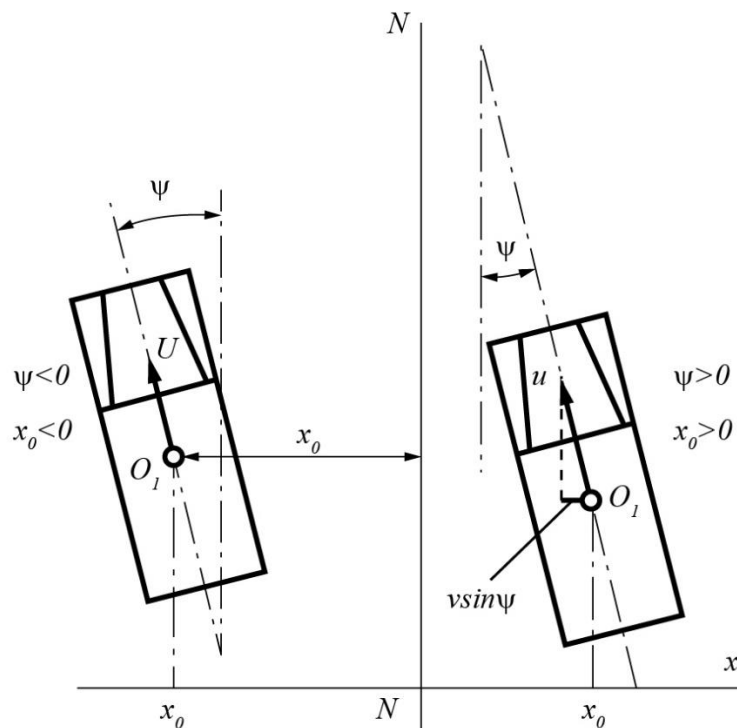


Рис. 1 – Визначення вихідних величин самохідної колісної машини як об'єкта керування при русі стеження

Другою вихідною величиною служить курсовий кут ψ між поздовжньою віссю самохідної машини та опорною траєкторією. Якщо опорну траєкторію NN поєднати з віссю ординат, то величина та знак x_0 визначаються за абсцисою точки O_1 . Знак величини ψ зручно вважати позитивним, якщо для перетину поздовжньої осі з опорною траєкторією необхідно продовжити вісь у напрямку вектору швидкості машини. В іншому випадку приймається $\psi < 0$. При цьому знак ψ залежить від знаку x_0 , але у процесі керованого руху самохідної машини зв'язок між ψ і x_0 простежується дуже наочно.

Прямим результатом керуючого впливу x_y на поворотний механізм машини, служить поява першої похідної $d\psi / dt$ (якщо не враховувати перехідний процес).

Непрямим результатом є одночасна зміна ψ і x_0 . Якщо керований поворот машини припиняється в момент, коли $\psi \neq 0$, то зміна x_0 не припиняється і тоді:

$$\frac{dx_0}{dt} = v \sin \psi \quad (1)$$

Якщо $\psi < 8^\circ$, що зазвичай виконується при русі стеження, то:

$$\frac{dx_0}{dt} \approx v\psi \quad (2)$$

та

$$x_0 = \int v\psi dt \quad (3)$$

Зменшуючись до нуля, x_0 потім змінює знак та продовжує необмежено збільшуватися, не дивлячись на те, що $\psi = const$.

Зв'язок між ψ та x_y також має інтегральний характер, оскільки під час керованого повороту:

$$\frac{d\psi}{dt} = k_0 x_y \quad (4)$$

$$\psi = \int k_0 x_y dt + \psi_0 \quad (5)$$

де ψ_0 – значення курсового кута до початку повороту; k_0 – коефіцієнт посилення об'єкта, що залежить від ефективності поворотного механізму і швидкості руху v , оскільки $\frac{d\psi}{dt} = \frac{v}{R}$, де

R – радіус кривизни траєкторії керованого повороту, причому $R = f\left(\frac{1}{x_y}\right)$.

З (2) та (4) отримаємо:

$$\frac{d^2 x_0}{dt^2} = v \frac{d\psi}{dt} = vk_0 x_y \quad (6)$$

Звідси, у першому наближенні, передавальна функція самохідної машини матиме вигляд:

$$W_{x_0} = \frac{k}{p^2} \quad (7)$$

де $k = k_0 v$ – коефіцієнт посилення; p – оператор диференціювання.

Аналіз результатів досліджень.

Цій спрощеній математичній моделі самохідної машини відповідає структурна схема, що показана на рис. 2, а, де самохідна машина, як об'єкт управління за x_0 , є послідовним з'єднанням двох ідеальних інтегруючих ланок.

Необхідне уточнення першого наближення пов'язано з тим, що встановлення кінцевого значення відбувається миттєво, як передбачалося вище. Чим більша швидкість руху і вага машини, тим сильніше проявляється інерційність керованого повороту, що пояснюється зростанням кінетичної енергії. Отже, машина поводить як інерційна інтегруюча ланка, рівняння динаміки якої

$$T \frac{d^2 \psi}{dt^2} + \frac{d\psi}{dt} = k_0 x_y \quad (8)$$

В результаті передавальна функція набуває вигляду

$$W_{x_0} = \frac{k}{p^2(Tp+1)} \quad (9)$$

а в структурну схему (рис. 2, б) додається аперіодична (інерційна) ланка.

Постійна часу T , що залежить від кінетичної енергії машини, збільшується зі зростанням v і моменту інерції машини відносно вертикальної осі, що проходить через центр інерції.

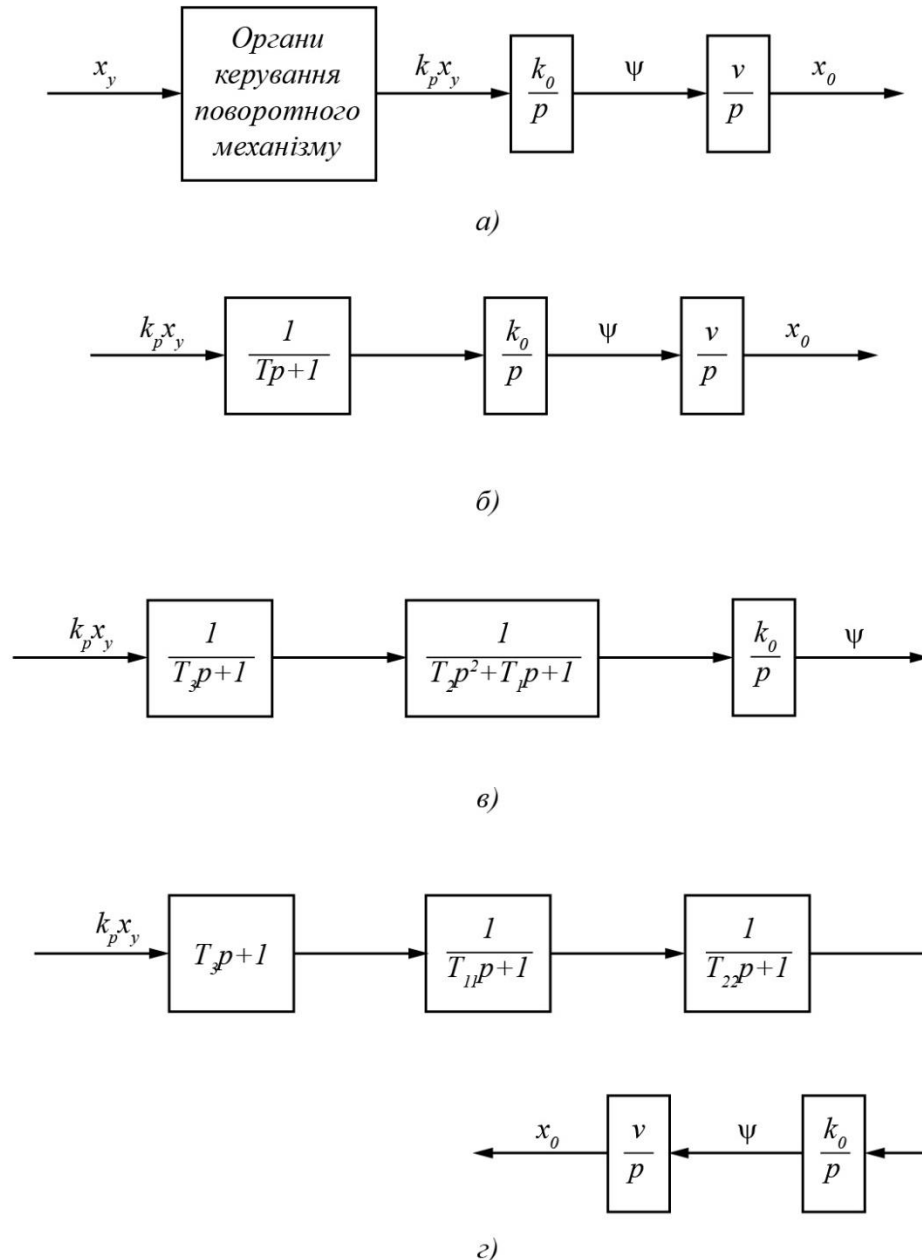


Рис. 2 – Математичні моделі (структурні схеми) самохідної машини як об'єкту управління

Слід врахувати, однак, що коефіцієнти посилення інтегруючих ланок і постійна часу T інерційної ланки істотно залежать від заздалегідь непередбачуваних і постійно мінливих факторів, які дестабілізують швидкість v . Тому самохідна машина є об'єктом управління з нестационарними параметрами, що доволі суттєво ускладнює автоматизацію її водіння. Крім того, коефіцієнт посилення першої інтегруючої ланки (з вихідною величиною ψ) зазвичай залежить від x_y . Це помітно і в колісних машинах, оскільки

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{v}{R} \approx \frac{v}{Lctg\alpha} \approx \frac{v}{Lctgk_p x_y} \quad (10)$$

Необхідно звернути увагу, що особливо сильно виявляється нелінійність в гусеничних машинах з фрикційними органами управління поворотним механізмом. Тому гусенична машина повинна розглядатися як суттєво нелінійний об'єкт управління. Нестационарність цього об'єкта також значно більша, ніж колісної машини, оскільки коефіцієнт посилення першої інтегруючої ланки дуже залежить від опору руху, насамперед від тягового опору сільськогосподарського знаряддя.

Для подальшого уточнення передавальної функції колісної самохідної машини потрібен аналіз диференційного рівняння руху в горизонтальній площині з урахуванням пружності шин, що викликає відведення коліс. Нижче наводиться без висновку результат перетворення цього рівняння, вперше отриманого Я.І. Певзнером при деяких припущеннях (кути повороту передніх коліс рівні і досить малі ($<15^\circ$), ковзання коліс відсутнє, кути відведення для коліс однакові та лінійно залежать від бічних реакцій):

$$\frac{d^3\psi}{dt^3} + (A + D)\frac{d^2\psi}{dt^2} + (AD - BC)\frac{d\psi}{dt} = (mD - nB)k_0 x_y + mk_0 \frac{dx_y}{dt} \quad (11)$$

де

$$\begin{aligned} A &= \frac{a_0^2 k_A + b^2 k_B}{Jv_a}; \\ B &= \frac{a_0 k_A - b k_B}{Jv_a}; \\ C &= v_a + \frac{a_0 k_A - b k_A}{Mv_a}; \\ D &= \frac{k_B + k_A}{Mv_a}; \\ m &= \frac{k_A a_0}{J}; \\ n &= \frac{k_A}{M}. \end{aligned} \quad (12)$$

тут прийняті наступні позначення: a_0 – відстань від центру інерції машини до передньої осі; b – відстань від центру інерції до задньої осі; M – маса машини; J – момент інерції відносно вертикальної осі; v_a – швидкість машини; k_A і k_B – коефіцієнти опору відведення осей машини, що рівні сумі коефіцієнтів опору відведення правого та лівого коліс.

Ввівши нові позначення коефіцієнтів у вигляді постійних часу і виконуючи необхідні перетворення, отримуємо передавальну функцію за ψ (їй відповідає структурна схема, що зображена на рис. 2, в):

$$W_\psi = \frac{k_0(T_3 p + 1)}{p(T_2 p^2 + T_1 p + 1)} \quad (13)$$

Передавальна функція за x_0 набуває вигляду:

$$W_{x_0} = \frac{k(T_3 p + 1)}{p^2(T_2 p^2 + T_1 p + 1)} \quad (14)$$

Їй відповідає структурна схема, що наведена на рис. 2, г у вигляді послідовного з'єднання наступних чотирьох ланок: двох інтегруючих, коливальної та ідеальної форсуючої ланки. Останнє, в свою чергу, представляє паралельне з'єднання підсилювальної ланки з коефіцієнтом посилення 1 і диференціуючої ланки з передатною функцією $T_3 p$. Коливальна ланка при

$2T_2 < T_1$ вироджується в послідовне з'єднання двох інерційних ланок з постійними часу T_{11} і T_{22} .

Висновки.

Отже, відведення коліс, що характерне переважно для транспортних машин, призводить до досить складної математичної моделі об'єкта управління. Фізично це пояснюється розбіжністю напрямків сили тяги та вектору швидкості.

Аналогічний результат виходить у тому випадку, коли досліджується гусенична машина. Але фізична причина появи у схемі ідеальної форсуючої ланки тут, звичайно, інша: під дією тягового опору зміщується назад відносно опорної точки O_1 (рис. 1) миттєвий полюс повороту.

Своєрідність самохідної машини як об'єкта, що виконує рух стеження, виявляється в тому, що в структурну схему додається ще одна інтегруюча ланка. Тому в одноконтурній структурній схемі системи автоматичного водіння завжди присутні мінімум дві послідовно з'єднані інтегруючі ланки.

Список літератури

1. Калінін Є.І. Частотно-динамічна математична модель тракторного агрегата з передачею крутного моменту до рушіїв сільськогосподарської машини. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2015. Вип. 156. С. 327-334.
2. Гуськов В.В. Тракторы. В III ч. Ч. III. Конструирование и расчет: учеб. пособие для вузов. Минск : Выш. шк., 1981. 383 с.
3. Пастух С.Н., Кустаров Р.А. Динамика машин: учеб. пособие. Москва: Воен.-инженер. акад., 2005. 189 с.
4. Калінін Є.І., Романченко В.М., Юр'єва Г.П. Формування умови стійкості лінійної системи при випадкових збуреннях її параметрів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 7. С. 100-108.
5. Калінін Є.І., Шуляк М.Л., Шевченко І.О. Дослідження перехідних процесів в коробці змінних передач мобільного енергетичного засобу. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2016. Вип. 168. С. 73-79.
6. Shuliak, M.; Klets, D.; Kalinin, Y.; Kholodov, A. Selecting a Rational Operation Mode of Mobile Powertrain Using Measuring and Control Complex. In *Proceedings of the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications*. Kherson. Ukraine. 12–15 June 2019. Volume 2387. pp. 141–151.
7. Rebrov O., Kozhushko A., Kalchenko B., Mamontov A., Zakovorotniy A., Kalinin Y., Holovina E. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor. *EUREKA, Physics and Engineering*. 2020. 4, pp. 90-100.
8. Лебедев А.Т., Калінін Є.І., Шуляк М.Л., Колеснік І.В. Аналітична модель повороту трактора з шарнірнозчленованою рамою. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2016. Вип. 173. С. 161 – 167.
9. Лебедев А.Т., Калінін Є.І. Оцінка можливості підвищення тягово-енергетичних властивостей машинно-тракторного агрегату при виконанні орних робіт на агрофоні підвищеної вологості шляхом встановлення здвоєних шин. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2009. Вип. 89. С. 37 – 45.
10. Кожушко А.П. Підвищення техніко-економічних показників колісних тракторів з безступінчастими трансмісіями раціональною зміною параметрів регулювання гідромашин в процесі розгону : автореф. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.02. Харків, 2016. – 24 с.
11. Кожушко А.П., Григор'єв О.Л. Математичне моделювання вільних і вимушених коливань рідини в горизонтальній ємності з вільною поверхнею. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2018. № 3 (1279). С. 41 – 51.
12. Razaghi R., Sharavi M., Feizi M. M. Investigating the effect of sloshing on the energy absorption of tank wagons crash. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2015. № 39(2). P. 187 – 200.

References (transliterated)

1. Kalinin Ye.I. Chastotno-dynamichna matematychna model traktornoho ahrehata z peredacheiu krutnoho momentu do rushiiv silskohospodarskoi mashyny. *Visnyk KhNTUSH im. Petra Vasylenka*. 2015. Vyp. 156. S. 327-334.
2. Huskov V.V. Traktori. V III ch. Ch. III. Konstruyrovanye y raschet: ucheb. posobyе dlia vtuzov. Mynsk : Vysh. shk., 1981. 383 s.
3. Pastukh S.N., Kustarov R.A. Dynamyka mashyn: ucheb. posobyе. Moskva: Voen.-ynzhener. akad., 2005. 189 s.
4. Kalinin Ye.I., Romanchenko V.M., Yurieva H.P. Formuvannia umovy stiikosti liniinoi systemy pry vypadkovykh zburenniakh yii parametriv. *Tekhnichniyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. 2017. № 7. S. 100-108.
5. Kalinin Ye.I., Shuliak M.L., Shevchenko I.O. Doslidzhennia perekhidnykh protsesiv v korobtsi zminnykh peredach mobilnoho enerhetychnoho zasobu. *Visnyk KhNTUSH im. Petra Vasylenka*. 2016. Vyp. 168. S. 73-79.

6. Shuliak, M.; Klets, D.; Kalinin, Y.; Kholodov, A. Selecting a Rational Operation Mode of Mobile Powertrain Using Measuring and Control Complex. *In Proceedings of the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications*. Kherson. Ukraine. 12–15 June 2019. Volume 2387. pp. 141–151.
7. Rebrov O., Kozhushko A., Kalchenko B., Mamontov A., Zakovorotnyy A., Kalinin Y., Holovina E. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor. *EUREKA, Physics and Engineering*. 2020. 4, pp. 90-100.
8. Lebediev A.T., Kalinin Ye.I., Shuliak M.L., Koliesnik I.V. Analitichna model povorotu traktora z sharnirnozchlenovanoi ramoiu. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka*. 2016. Vyp. 173. S. 161 – 167.
9. Lebediev A.T., Kalinin Ye.I. Otsinka mozhyvosti pidvyshchennia tiahovo-enerhetychnykh vlastyvostei mashynno-traktornoho ahrehatu pry vykonanni ornnykh robit na ahrofoni pidvyshchenoї volohosti shliakhom vstanovlennia zdvoienykh shyn. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka*. 2009. Vyp. 89. S. 37 – 45.
10. Kozhushko A.P. Pidvyshchennia tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv kolisnykh traktoriv z bezstupinchastymy transmisiiamy ratsionalnoi zminoiu parametriv rehuliuвання hidromashyn v protsesi rozghonu : avtoref. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.22.02. Kharkiv, 2016. – 24 s.
11. Kozhushko A.P., Hryhoriev O.L. Matematychni modeliuvannia vilnykh i vymushenykh kolyvan ridyny v horyzontalnii yemnosti z vilnoi poverkhnei. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. 2018. № 3 (1279). S. 41 – 51.
12. Razaghi R., Sharavi M., Feizi M. M. Investigating the effect of sloshing on the energy absorption of tank wagons crash. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2015. № 39(2). P. 187 – 200.

Надійшла (received) 11.05.2023 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Калінін Євген Іванович (Kalinin Evgeny) – доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6191-8446>; e-mail: kalinin@nubip.edu.ua.

Ребров Олексій Юрійович (Rebrov Oleksii) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-9992>; e-mail: alexrebrov0108@gmail.com.

Колодненко Віталій Миколайович (Kolodnenko Vitalii) – Сумський національний аграрний університет, старший викладач кафедри агроінжинирингу, м. Суми, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8450-6759>; e-mail: kolodnenko_vn@ukr.net.