

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПОЛЕМ ПОВНОПРИВІДНОЇ КОЛІСНОЇ ТЕХНІКИ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ MATLAB SIMULINK

Георгій Худавердян<sup>1</sup>, аспірант, Віталій Хома<sup>2</sup>, аспірант, Любомир Крайник<sup>3</sup>, д. т. н.

*Львівський національний університет природокористування,*

*вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,*

*<sup>1</sup>e-mail: georgiu.kh@gmail.com; <sup>2</sup>e-mail: homa.v@hotmail.com; <sup>3</sup>e-mail: l.krainyk@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.164>

### **Худавердян Г., Хома В., Крайник Л. Імітаційне моделювання руху полем повнопривідної колісної техніки у програмному середовищі MATLAB Simulink**

Представлена опрацьована імітаційна модель руху універсальних колісних транспортних засобів типу Mercedes-Benz Unimog, що поєднує в собі як функції невеликого колісного трактора, так і повнопривідної вантажівки для руху, зокрема й бездоріжжям, у програмному середовищі MATLAB Simulink на технологічних операціях (обробіток ґрунту) та в транспортному режимі. Математичний опис взаємодії коліс та навісного обладнання з поверхнею ґрунту, що деформується, ґрунтується на так званій WES-методиці армії США, що є загальноприйнятною і за межами НАТО та суттєво відрізняється від методології, прийнятої в колишньому СРСР. Оцінка фізико-механічних властивостей опорної поверхні на базі так званого конусного індексу CI, який визначається стандартизованим вимірюванням опору деформації конусоподібним пенетрометром, дозволить більш адекватно змоделювати процеси взаємодії колеса з пневматичною шиною з поверхнею, що деформується, та, відповідно, більш адекватно здійснити як оцінку адекватності конкретних конструкцій машин, так і нових моделей машин під час проєктних робіт. У процесі проєктних робіт щодо малотоннажної повнопривідної універсальної колісної машини, що дає змогу виконувати як технологічні операції обробітку ґрунту (аграрна та комунальна сфери), так і забезпечувати транспортування вантажів, зокрема й в умовах бездоріжжя, визначальним є формування необхідного діапазону передатних чисел трансмісії, зокрема необхідних значень знижувальних передач роздавальної коробки як для транспортного, так і технологічного режимів роботи. Наша праця присвячена формуванню відповідної імітаційної моделі руху.

**Ключові слова:** імітаційна модель, колісна машина, бездоріжжя, технологічні операції, динаміка руху.

### **Khudaverdian H., Khoma V., Krainyk L. Simulation modeling of field movement of four-wheel drive vehicles in the MATLAB Simulink software environment**

The work presents the developed simulation model of the movement of universal wheeled vehicles of the Mercedes-Benz Unimog type, which combines both the functions of a small wheeled tractor and a four-wheel drive truck for movement, including off-road, in the MATLAB Simulink software environment for technological operations (tillage) and in transport mode. Machines of this type were widely used in the post-war Europe and are relevant for Ukraine as well. The mathematical description of the interaction of wheels and attached equipment with the deformable soil surface is based on the so-called WES methodology of the US Army, which is generally accepted and outside NATO and is significantly different from the methodology adopted in the former USSR. Assessment of the physical and mechanical properties of the bearing surface on the basis of the so-called CI cone index, which is determined by standardized measurement of resistance to deformations with a cone-shaped penetrometer, will allow to more adequately model the processes of interaction of a wheel with a pneumatic tire with a deforming surface and, accordingly, more adequately implement as assessment of the adequacy of specific machine designs, as well as during design work of new machine models. In the process of design work on a low-tonnage four-wheel drive universal wheeled machine, which allows to perform both technological operations of soil cultivation (agricultural and communal spheres), and to ensure the transportation of goods, including in off-road conditions, the formation of the necessary range of gear ratios of the transmission, in particular the required values downshifts of the transfer box for both transport and technological modes of operation. This work is actually devoted to the formation of a corresponding simulation model of movement.

**Key words:** simulation model, wheeled vehicle, off-road, technological operations, traffic dynamics.

**Постановка проблеми.** Імітаційне моделювання та математичний опис динаміки руху автомобіля/трактора бездоріжжям, зокрема й обробітку сільськогосподарських земель, є основою не тільки оцінки ефективності тих чи інших констру-

кцій, а й вибору-розрахунку необхідних базових конструктивних параметрів і характеристик відповідних колісних машин у процесі проєктування.

Слід констатувати фактично два різні методологічні підходи щодо моделювання-оцінки вза-

емодії колеса з опорною поверхнею, що деформується, – підхід так званої східної школи колишнього СРСР та пострадянських держав, що базується на класичній механіці ґрунтів для будівництва (модуль Юнга – модуль деформації тощо), і підхід так званої західної школи, в основу якого покладено більш наближену методику до реалій руху колеса.

В основу WES-методики покладено більш наближену до реалій взаємодії ведучого колеса з ґрунтовою/піщаною поверхнею оцінку фізико-механічних характеристик ґрунтової/піщаної поверхні на базі так званого конусного індексу CI (Cone Index), що одночасно враховує як опір деформації у вертикальному (навантаження на колесо), так і горизонтальному (зсув, переміщення колеса) напрямках [3; 10; 11 та ін.]. Отримані емпірично значення CI для різних типів і станів вологості ґрунту є основою для визначення опору руху колеса (у тому числі глибини колії і ступеня ущільнення ґрунту в колії). Ефект ущільнення ґрунту та відповідно покращання зчїпних властивостей і зменшення опору рухові – продавлювання шинами опорної поверхні – зумовив домінування однорозмірності ширини колії і одинарних шин для наступних за передньою віссю осей, насамперед військової автотехніки, що покращує як прохідність, так і мобільність (швидкісні режими руху) колісних машин бездоріжжям.

З появою у післявоєнній Німеччині універсальних колісних повнопривідних машин типу Унімог (Unimog) (рис. 1) [8; 9], що поєднують у собі як функції автомобіля, так і трактора (Автотрак), цей тип машин набув популярності і в інших країнах (Італії, Греції, КНР, РФ та ін.) та є актуальним і для України, тим паче, враховуючи ще наявний промисловий потенціал і дороговизну імпорту з ЄС, особливо для невеликих фермерських господарств. Зі зміщенням існуючого типуажу Унімог у середньотоннажну сферу (7–12 т повної маси), під комунальну, лісогосподарську та військову сфери використання, для невеликих фермерських господарств, зрештою і для комунальних служб невеликих ОТГ, які потреби в автотехніці та тракторах забезпечують лише за рахунок імпорту (з КНР, здебільшого вживаних з ЄС, донедавна і з РФ – ГАЗ «Газель», «УАЗ») [7], в Україні актуальним є саме малотоннажний клас (категорії N1/T повною масою до 3,5 т).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження руху колісних машин бездоріжжям методом імітаційного комп'ютерного моделювання в програмному середовищі MATLAB Simulink

є найбільш актуальними на сучасному етапі розвитку террамеханіки. Однак здебільшого вони зорієнтовані на оцінку мобільності руху військової автотехніки різними типами бездоріжжя [2; 3; 10; 11] та практично відсутні в аспекті технологій обробітку сільськогосподарських земель (оранка, культивуація тощо), а також руху бездоріжжям (полем) з причепом. Фактично як в аграрній, так і в комунальній сфері (на відміну від військової) домінантні режими роботи технологічних колісних машин-тракторів регламентуються певними агротехнологічними значеннями швидкостей, а не умовою максимізації швидкості руху, як для військової автотехніки. Звична наявність основного обладнання для обробітку ґрунту – плуг, борона тощо – не тільки суттєво збільшує сумарний опір рухові, а й здійснює динамічний перерозподіл навантажень на осі машини, що теж суттєво впливає на динаміку руху. Більш спрощеним варіантом у цьому разі є рух бездоріжжям колісної машини з причепом – у процесі проєктних робіт актуальною є оцінка допустимої маси причепа у співвідношенні до повної маси тягача – колісної машини (КМ) за умови забезпечення певних технологічних швидкостей руху (у тому числі супроводу іншої аграрної техніки), чи оцінка зменшення мобільності руху військової автотехніки. Очевидно, що загальноприйняті канони співвідношення мас тягача і причепа для доріг з асфальтобетонним покриттям у цьому разі теж є не безумовними.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – опрацювання в програмному середовищі MATLAB Simulink імітаційної моделі руху полем повнопривідної колісної техніки, у тому числі з причіпним/навісним обладнанням. Вказана модель визначає максимальну швидкість руху повнопривідних автомобілів за умови руху бездоріжжям на двох основних типах зв'язних ґрунтів з відомими фізико-механічними характеристиками [4] за методикою WES [3]. Окрім цього, завданням моделювання є дослідження мобільності руху універсальної КМ з умов оцінки сумарного опору рухові в процесі обробітку ґрунту/транспортування причепа, що є умовою визначення й оцінки ефективності передатних чисел знижувальних передач роздавальної коробки КМ.

**Виклад основного матеріалу.** Опрацьована раніше структура алгоритму імітаційного моделювання руху автомобілів бездоріжжям у програмному середовищі MATLAB Simulink [2] зумовлює необхідність відповідних суттєвих змін і розвитку під вищевикладені завдання. Практичну основу

формування структури алгоритму імітаційного моделювання під вищезазначені завдання становлять:

- введення додаткових навантажень на зчпний пристрій у вертикальній  $F_z$  (рис. 1) та горизонтальній  $F_x$  площинах від дії причепа/навісного обладнання обробітку ґрунту;
- врахування ефекту ущільнення опорної поверхні/ґрунту при проходженні колії передньої

осі наступними осями (задньою віссю КМ та віссю причепа, колеса навісного обладнання, у разі його наявності), яка здебільшого не збігається з колією тягача, і опір його рухові розраховується за схемою прокладення колії, як для першої осі КМ;

- формування опору рухові ґрунтообробного обладнання здійснюється на базі відомих положень теорії зрізу ґрунту плугом, як найбільш енергозатратним видом обробітку ґрунту [1; 5].

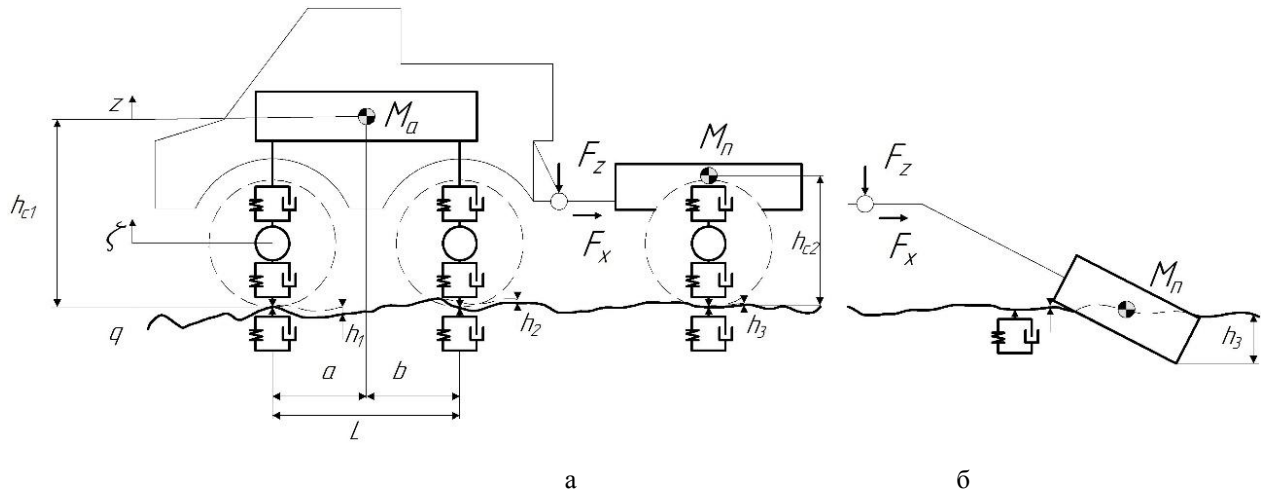


Рис. 1. Динамічна еквівалентна схема колісних машин з причепом (а) та знаряддям обробітку ґрунту (б)  
 Fig. 1. Dynamic equivalent scheme of wheeled machines with a trailer (a) and tillage tools (b)

Математична модель динаміки КМ з навісним обладнанням/причепом фактично охоплює три можливі комбінації:

1) рух автомобіля з причепом бездоріжжям з метою оцінки прохідності конкретної опорної поверхні та можливої мобільності руху (верхня межа якої обмежується досягненням граничних порогових значень віброколивних навантажень на організм водія);

2) рух КМ з навісним обладнанням у процесі обробітку ґрунту з дотриманням певного діапазону швидкості з умов агротехнології (оранка, як найбільш енергозатратний обробіток ґрунту, звично здійснюється зі швидкістю руху 6–8 км/год);

3) рух КМ з технологічним обладнанням на колесах та з використанням тягово-зчпного пристрою з гідроциліндром вертикального навантаження на робочі органи обладнання (занурення в ґрунт чи підйому лемішів плуга чи культиватора).

КМ типу Унімог/Автотрак обладнані підвіскою. Тому без врахування пружно-демпфірувальних характеристик сидіння водія опис динаміки переміщень вищезазначених компонентів КМ у поздовжньому напрямі руху  $X$  та вертикальній площині  $Z$  на основі принципу д'Аламбера пред-

ставлено з певним наближенням системою рівнянь:

$$\begin{cases} M_a \ddot{z} - k_1(\dot{z} - \dot{\zeta}) - k_2(\dot{z} - \dot{\zeta}) - F_2 - c_1(\zeta - q) - c_2(\zeta - q) = 0 \\ m_1 \ddot{\zeta} + \frac{M_a \times b}{L}(\dot{z} - \dot{\zeta}) + k_1(\dot{z} - \dot{\zeta}) + \frac{M_a \times a}{L}(\dot{z} - \dot{\zeta}) + k_{w1}(\dot{\zeta} - \dot{q}_1) - k_{w2}(\dot{\zeta} - \dot{q}_2) - c_{w1}(\zeta - q_1) - c_{w2}(\zeta - q_2) = q(t) \\ \frac{T_e u_1 u_p u_0 \eta_T}{r_k} - F_W(\dot{x}) - F_0(\dot{x}) = (M_a + \frac{m_1 + m_2}{k} + M_n) \delta \ddot{x} \end{cases}$$

де  $y, \dot{y}, \ddot{y}$  – відповідно переміщення, швидкість

$\dot{y} = \frac{dy}{dt}$  та прискорення  $\ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2}$  КМ у вертикаль-

ній площині, аналогічно щодо координат у горизонтальній площині  $M_a, M_n, m_1, m_2, m_3$  – відповідно підресорені маси КМ, причепа та непідресорені маси передньої і задньої осей КМ і причепа;  $z$  – переміщення підресорених мас КМ;  $\zeta$  – переміщення непідресорених мас;  $q$  – змінна координат мікропрофілю опорної поверхні (з урахуванням зміни глибин колії  $h$  при послідовному проходженні кожної з осей);  $k$  та  $k_w$  – демпфірувальні параметри підвіски і шин;  $c$  та  $c_w$  – відповідно пружні характеристики (жорсткість) підвісок та шин;  $T_e, \eta_T$  – крутний момент двигуна та ККД

трансмсії;  $r_k$  – радіус кочення ведучих коліс;  $u_i, u_p, u_0$  – передатні числа відповідно у коробці передач, роздавальної та головної передач;  $F_w$  – сила опору повітря;  $F_0$  – сумарна сила опору рухові;  $\delta$  – коефіцієнт інерції обертових мас (коліс, двигуна).

Власне, сила опору рухові КМ у цьому випадку докорінно відрізняється від звичного руху КМ на автодорогах, і домінуючою тут є не сила опору коченню коліс чи аеродинаміки, а саме опір деформації ґрунту та зусилля від навісного обладнання (опір рухові ведених коліс причепа в прокладеній колії є значно меншим, особливо якщо шини/колеса уніфіковані з КМ).

Практично можна констатувати, що для аграрного сектору при відомих, невеликих технологічних швидкостях руху в діапазоні 5–20 км/год рівень віброколивних навантажень на організм людини далекий від порогових значень (переважна більшість колісних тракторів не обладнана підвіскою, застосовується тільки підресорювання сидіння водія). Відповідна до задачі імітаційного моделювання технологічних процесів обробітку ґрунту динаміка КМ у вертикальній площині  $z$  в аспекті віброколивних навантажень на організм людини є малозначущою і обмежується тільки врахуванням зміни вертикальних навантажень на осі КМ під впливом зусилля притискання/занурення  $F_z$  (див. рис. 1), що впливає на перерозподіл навантаження на осі КМ та, відповідно, на формування опору рухові/деформації ґрунту.

Таким чином, з викладеного випливає формування двох дещо відмінних структур алгоритмів імітаційного моделювання руху КМ та навісного/прицепного обладнання в програмному середовищі MATLAB Simulink:

- з умов оцінки потенційної мобільності руху бездоріжжям КМ з причепом, як з умов прохідності місцевості, так і обмеження максимальної швидкості руху досягненням гранично допустимого, порогового рівня віброколивних навантажень на організм людини, де необхідно враховувати і динаміку вертикальних переміщень підресорених мас (очевидно, бажано і з врахуванням вібродемпфірувальних характеристик сидінь та, певним чином, і ґрунту, опорної поверхні);

- з умов оцінки сумарного опору рухові в процесі обробітку ґрунту/транспортування причепа, що є умовою визначення й оцінки ефективнос-

ті передатних чисел знижувальних передач роздавальної коробки передач КМ, достатньо обмежитись моделюванням динаміки руху в горизонтальній площині  $x$  (очевидно, з врахуванням зміни/перерозподілу навантажень на осі КМ через вертикальне навантаження на тягово-зчіпному пристрої  $F_z$ , див. рис. 1).

Додатковий опір за механічного обробітку ґрунту ґрунтується на відомій залежності професора В. Горячкіна [1; 5].

Звичайно, що, окрім конструктивних параметрів плуга, значну роль відіграють і фізико-механічні характеристики ґрунту зі значним діапазоном коливань. Характеристики типових для України орних земель подані в методології східної школи террамеханіки – модуль деформації/модуль Юнга [6], однак відомі емпіричні залежності переходу між значеннями  $E$  та  $CI$  [3] дають змогу визначити додатково силу опору руху за механічного обробітку ґрунту.

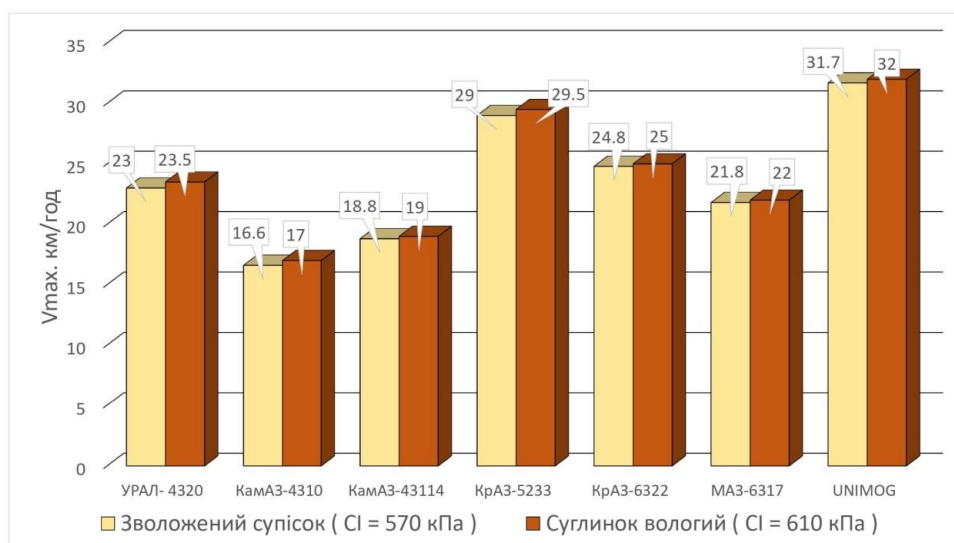
Оптимальним засобом для побудови еквівалентної комп'ютерної моделі виступає програмний комплекс MATLAB Simulink, який дозволяє порівняно легко задавати вихідні параметри, тобто робота оператора не вимагає глибоких знань та навичок. Сама побудова моделі ґрунтується на поєднанні модулів (блоків), що надає такій моделі широких можливостей щодо гнучкості для внесення змін, які відображають конструктивні особливості транспортного засобу. З використанням програмного комплексу MATLAB Simulink побудовано імітаційну модель з великою кількістю налаштувань вхідних даних, що дає змогу швидко оцінити вплив різних чинників на параметри прохідності повнопривідної КМ на бездоріжжі (у нашому випадку – на максимальну швидкість руху/обробітку ґрунту).

Інтерфейс програми для визначення  $V_{\max}$  та з додатковим визначенням оптимального передатного числа роздавальної коробки з умов технологічних операцій обробітку ґрунту в програмному середовищі MATLAB Simulink наведено на рис. 2.

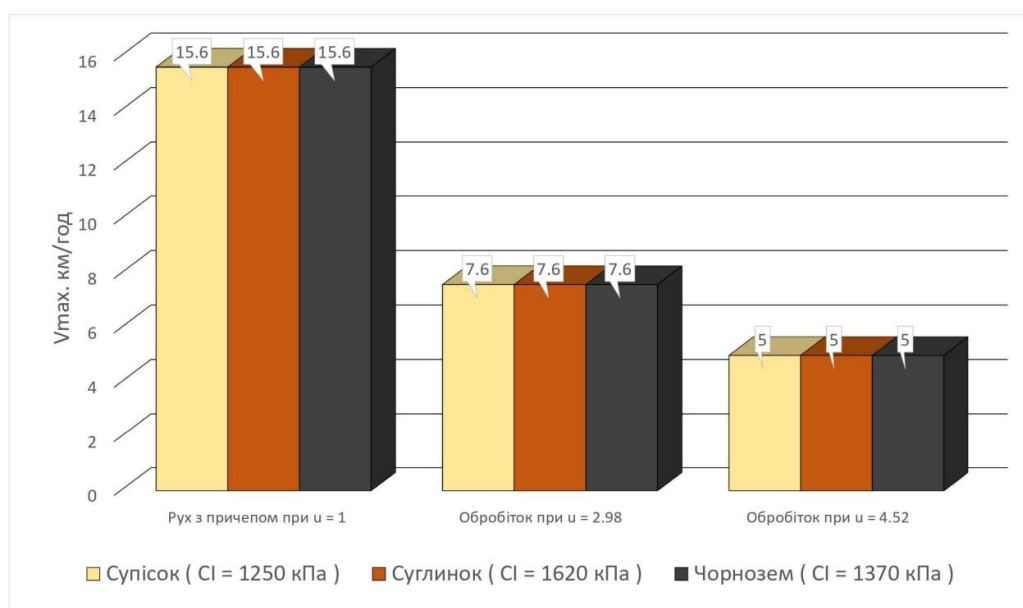
Детальна блок-схема моделі на основі стандартних блоків програмного середовища MATLAB Simulink подана на рис. 3.

Під час визначення максимальної швидкості руху доцільно задаватися опорними поверхнями, наведеними в праці [4], оскільки при порівнянні результатів моделювання руху бездоріжжям та експериментальних даних для інших зразків пов-





**Рис. 4.** Результати моделювання руху КМ заданим бездоріжжям  
**Fig. 4.** Results of the simulation of the CM movement CM on the given off-road



**Рис. 5.** Результати моделювання процесу обробітку ґрунту  
**Fig. 5.** Results of modeling the soil treatment process

**Висновки.** Опрацьована в програмному середовищі MATLAB Simulink імітаційна модель руху КМ бездоріжжям/сільськогосподарськими полями дає змогу дати оцінку максимально можливих швидкостей руху з причепом та визначити сумарні зусилля опору руху – клас тяги колісного тягача при технологічних операціях обробітку ґрунту. Отримані результати щодо визначення максимально можливих швидкостей руху бездоріжжям КМ з причепом забезпечують достатню адекватність з експериментальними дослідження-

ми щодо автомобілів підвищеної прохідності [3]. Результати імітаційного моделювання процесів технологічного обробітку землі потребують, звичайно, відповідних експериментальних дослідів та оцінки рівня адекватності і є основою параметричної оптимізації передатних чисел трансмісії КМ типу Автотрак.

#### Бібліографічний список

1. Горячкин В. П. Собрание сочинений: в 3 т. Москва: Колос, 1965.

2. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Автошляховик України*. 2020. № 2. С. 21-28.
3. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Купріненко О. М. Методологія оцінки опорної прохідності колісної військової автомобільної техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 4. С. 22-31.
4. Грубель М. Г., Фтемов Ю. О., Хома В. В. Експериментальні дослідження параметрів опорної прохідності зразків колісної військової автомобільної техніки. *Системи озброєння та військова техніка*. 2019. № 4(60). С. 7-15.
5. Динаміка руху колісних тракторів: монографія / Б. І. Кальченко та ін. Харків: О. А. Мірошніченко, 2021. 320 с.
6. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. 1: Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. Харків: Око, 2011. 444 с.
7. Крайник Л. В., Худавердян Г. А. Концепція та формування вітчизняного універсального автомобіля типу Автотрак/Унімог для фермерських та комунальних господарств. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези доп. X Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. (Вінниця, 14-15 квіт. 2022р.). Вінниця: ВНТУ, 2022. С. 178-180.
8. Hochgeländegängiger Unimog – Mercedes-Benz Trucks – Trucks you can trust. URL: [https://www.mercedes-benz-trucks.com/de\\_DE/models/unimog-off-road.html](https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_DE/models/unimog-off-road.html) (Last accessed: 22.06.2022).
9. Mercedes-Benz History An In-Depth Look at the Mercedes Unimog eMercedesBenz. URL: <https://emercedesbenz.com/autos/mercedes-benz/unimog/mercedes-benz-history-an-in-depth-look-at-the-mercedes-unimog/> (Last accessed: 05.07.2022).
10. Wong Y. C. D., Lim H. H. S, Chan W. Q. W. An assessment of land vehicles trafficability. *DSTA HORIZONS*. 2016. P. 54-63. URL: <https://www.dsta.gov.sg/docs/default-source/dstaabout/an-assessment-of-land-vehicles-trafficability.pdf?sfvrsn=2/> (Last accessed: 07.07.2022).
11. Wong Y. J. Terramechanics and off-road vehicle engineering. Second ed. London: Butterworth–Hannemann, 2010. 482 p.

Стаття надійшла 29.08.2022