

УДК 327:355.02/629.001

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.10-17>М.Г. Грубель¹, М.О. Манзяк¹, В.В. Хома², О.В. Ланець³, А.М. Андрієнко¹¹Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів²Львівський національний університет природокористування, м. Дубляни³НУ «Львівська політехніка», м. Львів

Article history: Received 16 March 2023; Revised 17 March 2023; Accepted 31 March 2023

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОБІЛЬНОСТІ КОЛІСНОЇ ВІЙСЬКОВОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ЗА УМОВ РУХУ БЕЗДОРІЖЖЯМ

Потреба в забезпеченні високої мобільності зразків військової автомобільної техніки (ВАТ) спостерігалась в умовах збройних конфліктів останніх десятиріч і є особливо відчутною під час ведення російсько-української війни. Крім того, зазначений фактор також обумовлює зростання вимог до конструкцій зазначених зразків. Проаналізовано вплив показників прохідності, характеристик підвіски та шин на обмеження максимально можливих швидкостей руху бездоріжжям. Вказано на лімітування максимальних швидкостей руху залежно від гранично допустимих значень рівня віброколивних навантажень на водія та екіпаж, збурених нерівностями, мікропрофілем бездоріжжя та відповідними передавальними функціями підвіски й шин.

Проведено аналіз літературних джерел, а також стандартів щодо існуючих методик оцінки мобільності, визначення граничних віброколивних навантажень із точки зору обмеження максимальної швидкості руху зразка колісної ВАТ. Враховуючи, що визначальними при формуванні віброколивних навантажень є власне вертикальні коливання (питома значущість поздовжніх та поперечних коливань сумарно є в межах 20%), для дослідження впливу підвіски на віброколивні властивості побудовано адекватну фізичному процесу динамічну еквівалентну модель для зразка колісної ВАТ з колісною формулою 4x4. Відповідно до зазначеної моделі розроблено структурну схему імітаційного комп'ютерного моделювання руху колісних машин у програмному середовищі MATLAB Simulink.

Опрацьовано можливість та визначено параметри детермінованого задавання висот нерівностей мікропрофілю бездоріжжя з можливістю оперативної зміни як характеристик підвіски/шин, так і типу й характеру бездоріжжя. Адекватність моделі попередньо оцінювалась шляхом визначення ступеня відтворення відомих експериментальних досліджень та обумовлює доцільність формування типової ділянки мікропрофілю бездоріжжя для оцінки ефективності підвіски зразка колісної ВАТ.

Ключові слова: віброколивне навантаження, гранично допустиме значення, ділянка мікропрофілю бездоріжжя, еквівалентна коливна система, зразок колісної військової автомобільної техніки, імітаційна модель, опорна поверхня, пружно-демпфуюча характеристика.

Постановка проблеми

Необхідність кардинального оновлення парку колісної ВАТ ЗС України та узгодження його із сучасними вимогами, передбачає проведення відповідних досліджень щодо конструктивного синтезу основних елементів зразків колісної ВАТ, не обхідних тактико-технічних характеристик та експериментальну оцінку їх відповідності зазначеним вимогам. Особливої актуальності це питання набуло при застосуванні зразків колісної ВАТ в ході відбиття широкомасштабної агресії Силами оборони у російсько-українській війні.

Актуальність проблеми підвищення мобільності ВАТ під час руху бездоріжжям є очевидною, та додатково підтверджена існуючими світовими тенденціями щодо промислового впровадження в зразки колісної ВАТ нового покоління незалежних механічних

підвісок зі значно збільшеною амплітудою ходу підвіски. Показовим у цьому плані є впровадження в автомобілі Oshkosh підвіски типу Timoney (ТАК-4) [1–2] та активних, напівактивних підвісок з автоматичним регулюванням пружних і демпфуючих характеристик [3–4].

Це також передбачає формування національної нормативної бази з урахуванням стандартів НАТО [5–6] для підвищення технічного рівня зразків колісної ВАТ, що виготовляються в Україні чи плануються до постачання країнами-партнерами, з одного боку, та досягнення взаємосумісності з аналогічними зразками країн-членів НАТО – з іншого.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проведений аналіз публікацій щодо оцінки мобільності військ НАТО під час підготовки і ведення бойових дій показав, що основним інструментом,

який дозволяє прогнозувати оперативну та тактичну мобільність військ і техніки на полі бою, а також оптимізувати вирішення логістичних завдань, є NATO Reference Mobility Model (NRMM) [7]. Ця модель являє собою сукупність рівнянь та алгоритмів для моделювання руху транспортного засобу пересіченою місцевістю.

Крім того, при опрацюванні моделі NRMM авторами встановлено, що врахування впливу підвіски на мобільність в умовах бездоріжжя базується на емпіричних спостереженнях. Однак, такий підхід не дозволяє чітко оцінити вплив конкретних характеристик підвіски та її типу на плавність ходу, що є визначальною при русі бездоріжжям.

Формування пружно-демпфуючих характеристик підвісок повноприводних автомобілів для бездоріжжя, а також розрахунок їх кінематики є значно складнішими в порівнянні з добре опрацьованою методологією щодо підвісок автомобілів загального призначення для доріг із твердим покриттям. Це полягає в різноманітності опорних поверхонь (ОП), у тому числі тих, що деформуються, які мають різні характеристики несної здатності, мікропрофіля поверхні, опорів коченню тощо. За таким умов виникають також проблеми розрахунку щодо поєднання пружно-демпфуючих характеристик підвіски як для асфальтобетонних доріг, так і для бездоріжжя на пересіченій місцевості.

Очевидно, що в силу логічного обмеження інформації щодо наукових досліджень у сфері колісної ВАТ, публікацій щодо кінематичного синтезу та розрахунку необхідних характеристик підвіски для повноприводних автомобілів і бездоріжжя явно недостатньо. Окремо слід виділити роботи професора Дуценка В.В. [4] та низку нещодавніх публікацій щодо незалежних підвісок типу Timoney зі збільшеною до 400–470 мм амплітудою їх ходу [1–2]. Проблеми оцінки підвіски в аспекті підвищення мобільності руху бездоріжжям присвячено ряд наукових досліджень, у тому числі й експериментальних [8–10]. Крім того, в сучасних нормативних вимогах щодо ВАТ, наприклад, у стандарті [5], відсутні конкретні вимоги щодо пружно-демпфуючих характеристик підвіски, шин чи сидінь, але надані власне порогові, допустимі значення віброколивних навантажень для екіпажу, досягнення яких і обмежує подальше збільшення швидкості руху конкретним бездоріжжям. З іншого боку, ці порогові значення є й вихідним орієнтиром для формування необхідних характеристик підвіски та шин на етапі проєктування нових моделей ВАТ і забезпечення необхідної мобільності руху в районі виконання бойових завдань.

Разом із тим, слід констатувати фактичну відсутність вітчизняних досліджень щодо оцінки

впливу параметрів підвіски на швидкісні характеристики руху автомобілів бездоріжжям.

Формулювання мети статті

Метою статті є розроблення імітаційної моделі руху зразка колісної ВАТ за умов бездоріжжя з урахуванням характеристик підвіски та нерівностей ОП.

Виклад основного матеріалу

Мобільність ВАТ – здатність досягати максимально можливих швидкостей руху бездоріжжям, що є особливо актуальним в умовах ведення сучасних збройних конфліктів останніх десятиріч та під час широкомасштабного вторгнення росії на територію України. Це обумовлює зростання вимог не тільки до конструкцій зразків ВАТ з точки зору прохідності, але й характеристик підвіски та шин як визначальних щодо забезпечення максимально можливих швидкостей руху бездоріжжям. Останні обмежуються (у т.ч. в нормативній базі НАТО) досягненням гранично допустимого (порогового) значення рівня віброколивних навантажень на організм людини, викликаних нерівностями, мікропрофілем бездоріжжя та відповідними передавальними функціями підвіски й шин [6].

Сьогодні основним методом оцінки плавності роботи підвіски є дорожні випробування. Вони зазвичай проводяться на спеціалізованих полігонах, де штучно відтворено дорожнє покриття, як приклад – дорожнє покриття типу “Бельгійська бруківка”. На рис. 1 показано основні параметри ділянки спеціалізованого полігона, де штучно відтворено дорогу з покриттям типу “Бельгійська бруківка”. Перепади висот мікропрофілю дороги, що являє собою оцифровану ділянку “Бельгійської бруківки” тестового треку Daimler AG, запозичено з бази даних Open CRG [11–12].

Такі дороги характеризуються значним перепадом висот мікропрофілю і є достатньо жорсткими з точки зору впливу коливань на організм людини.

Очевидно, що проведення натурального експерименту для усіх можливих варіантів підвісок та інших, потенційно змінних технічних параметрів, дозволило б оцінити роботу підвіски в комплексі, виявити вплив віброколивних навантажень на водія, екіпаж і на міцність конструкції корпусу. На початковому етапі більш логічно скористатись математичним моделюванням, що дозволить чисельними методами проаналізувати значну кількість різних умов руху та параметрів підвісок. Такий підхід дозволить зосередитись на ефективніших конструкціях підвісок, з точки зору мобільності руху бездоріжжям. Для побудови еквівалентної комп'ютерної моделі використано програмний комплекс MATLAB Simulink.

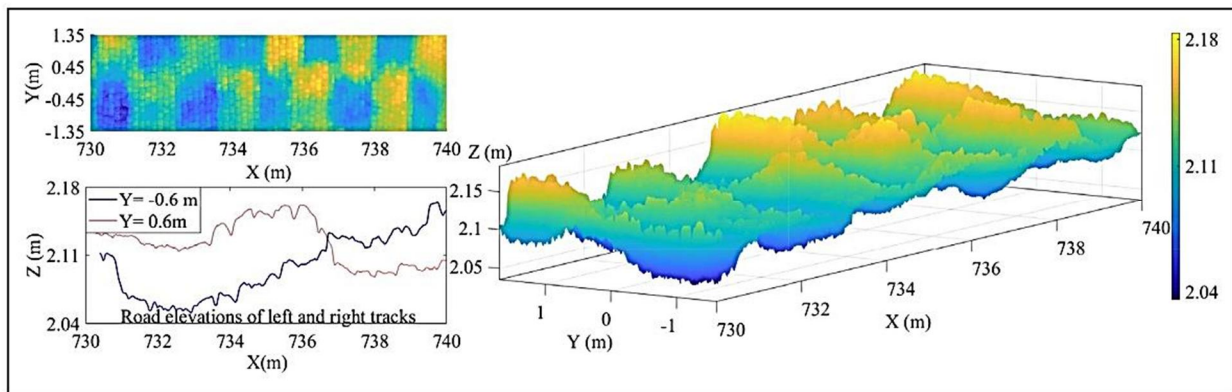


Рис. 1. Оцифрована ділянка “Бельгійської бруківки” тестового треку Daimler AG

Процес моделювання базується на аналізі публікацій за вказаною тематикою і включає наступні етапи:

- задання типового мікропрофілю для ОП типу “Бельгійська бруківка”;
- задання технічних характеристик автомобіля та параметрів підвіски;

- розрахунок вертикальних та поздовжніх коливань кузова автомобіля при русі із заданою швидкістю.

Структурна схема моделі на базі засобів імітаційного моделювання MATLAB Simulink показана на рис. 2.

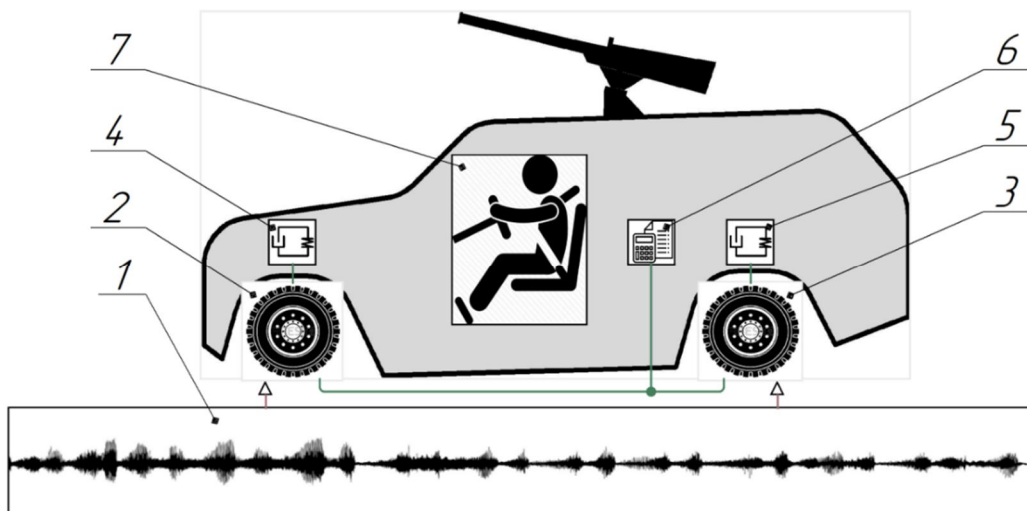


Рис. 2. Структурна схема імітаційної моделі оцінки мобільності колісної ВАТ на бездоріжжі:

1 – задання мікропрофілю ОП; 2, 3 – пружно-демпфуючі характеристики шин; 4, 5 – пружно-демпфуючі характеристики підвіски; 6 – блок розрахунку динаміки роботи підвіски; 7 – блок оцінки вібронавантаженості водія

При розгляді коливань зразок колісної ВАТ замінюють еквівалентною коливною системою. В загальному випадку вона складається з декількох мас підресорених і непідресорених частин, зв'язаних між собою.

Підресореною частиною зразка колісної ВАТ вважаються всі його елементи, вага яких передається ресорам або іншим пружним елементам підвіски. Елементи зразка, вага яких не передається на пружні елементи підвіски, називаються непідресореними.

Таким чином, підресореними елементами зразка колісної ВАТ є кузов, рама з прикріпленими на неї механізмами, а непідресорені – колеса в зборі з осями (мостами). Вагу пружних елементів підвіски, важелів напрямних пристроїв, амортизаторів, тяг кермового

привода і карданного вала відносять частково до ваги підресорених, а частково – до ваги непідресорених частин. У статті вагу всіх зазначених частин запропоновано поділити між підресореною частиною та непідресореною навпіл.

Враховуючи, що домінуючу частину віброколивань навантажень на організм водія й екіпажу зразка колісної ВАТ становлять власне вертикальні коливання (вібрації), а сумарна значущість коливань у поздовжньому та поперечному напрямках не перевищує 15–20%, в основу імітаційної моделі динаміки руху бездоріжжям покладено двомірну еквівалентну модель. Приклад для динамічної еквівалентної двовісної схеми наведений на рис. 3.

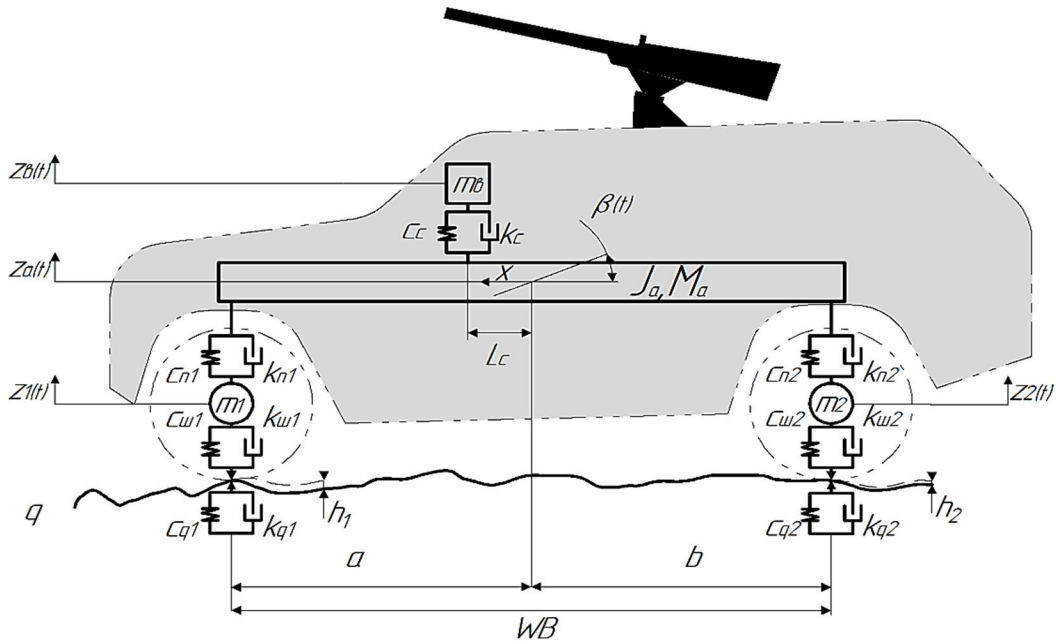


Рис. 3. Динамічна еквівалентна схема двовісного зразка колісної ВАТ:

m_B – маса водія; M_a – підресорена маса автомобіля; m_1, m_2 – непідресорені маси 1-ї та 2-ї осей відповідно; J_a – момент інерції кузова автомобіля; β – кут повздовжніх коливань; z_1, z_2 – вертикальні переміщення непідресорених мас 1-ї та 2-ї осей; z_a – вертикальні переміщення підресореної маси; z_c – вертикальні переміщення сидіння водія; z_b – вертикальні переміщення водія; k_{q1}, k_{q2} – коефіцієнт демпфування опорної поверхні в місці контакту коліс 1 і 2 осей; $k_{ш1}, k_{ш2}$ – коефіцієнт демпфування шин; $k_{п1}, k_{п2}$ – коефіцієнт демпфування амортизаторів 1 і 2 осей; k_c – коефіцієнт демпфування сидіння; c_{q1}, c_{q2} – коефіцієнт жорсткості опорної поверхні; $c_{ш1}, c_{ш2}$ – пружні характеристики шин; $c_{п1}, c_{п2}$ – пружні характеристики підвіски; c_c – пружна характеристика сидіння; WB – колісна база; a – відстань від передньої осі до центру коливань; b – відстань від задньої осі до центру коливань; L_c – відстань від центру коливань до центру мас водія; q – збурення мікропрофілю; x – напрямок руху

З метою отримання лінійної моделі припустимо невеликі відхилення координат від статичного положення, а також приймемо наступні припущення:

- колеса автомобіля мають точковий контакт із поверхнею дороги, а координати точок контакту повністю копіюють мікропрофіль;

- навантажувальні характеристики пружних елементів підвіски і амортизаторів лінійні (або лінеаризовані) коефіцієнти жорсткості c_q і опору постійні c_q ;

- усі дисипативні сили підвіски, включаючи тертя, враховуються еквівалентними коефіцієнтами опору, що входять у величину c_q ;

- шини ідеалізовані у вигляді пружно-демфуючої моделі з постійними коефіцієнтами $c_{ш1}, k_{ш1}$;

- характеристики і параметри підвіски та шин правих і лівих коліс однакові $c_{ш1} = c_{ш2}, k_{ш1} = k_{ш2}$ тощо;

- сили опору коченню і опору повітря не враховуються.

Математично модель динаміки руху в поздовжній та вертикальній площинах зведена до системи диференціальних рівнянь (для двовісного автомобіля і ОП, що деформується) (1–5).

При цьому, визначається вібронавантаження на водія з урахуванням пружно-демфуючих характеристик сидіння, вертикальні коливання підресорених мас, повздовжні коливання підресорених мас, коливання непідресорених мас першої та другої осей.

$$m_B \ddot{z}_B + k_c \dot{z}_B + c_c z_B = k_c (z_a + \dot{\beta} \times L_c) + c_c (z_a + \beta \times L_c) \quad (1)$$

$$M_a \ddot{z}_a + (k_{п1} + k_{п2}) \dot{z}_a + (c_{п1} + c_{п2}) z_a + (k_{q1} \times a + k_{q2} \times b) \dot{\beta} + (c_{п1} \times a + c_{п2} \times b) \beta + (\dot{z}_a + \dot{\beta} \times L_c) k_c + (z_a + \beta \times L_c) c_c = k_c \dot{z}_c + c_c z_c + k_{п1} \dot{z}_1 + k_{п2} \dot{z}_2 + c_{ш1} z_{c1} + c_{ш2} z_{c2} \quad (2)$$

$$J_a \ddot{\beta} + (k_{п1} \times a^2 + k_{п2} \times b^2) \dot{\beta} + (c_{п1} \times a^2 + c_{п2} \times b^2) \beta + (k_{п1} \times a + k_{п2} \times b) \dot{z}_a + (c_{п1} \times a + c_{п2} \times b) z_a + k_c (\dot{z}_a + \dot{\beta} \times L_c) L_c + c_c (z_a + \beta \times L_c) L_c = \quad (3)$$

$$= (k_c \dot{z}_a + c_c z_c) L_c + (k_{п1} \dot{z}_1 \times a + k_{п2} \dot{z}_2 \times b) + c_{п1} z_1 \times a + c_{п2} z_2 \times b \quad (4)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + (k_{п1} + k_{ш1}) \dot{z}_1 + (c_{п1} + k_{ш1}) z_1 - k_{п1} (\dot{z}_a + a \dot{\beta}) - c_{п1} (z_a + a \beta) = k_{ш1} \dot{q}_1 + c_{ш1} q_1 \quad (5)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + (k_{п2} + k_{ш2}) \dot{z}_2 + (c_{п2} + k_{ш2}) z_2 - k_{п2} (\dot{z}_a + b \dot{\beta}) - c_{п2} (z_a + b \beta) = k_{ш2} \dot{q}_2 + c_{ш2} q_2 \quad (5)$$

Відповідно до зазначеної моделі розроблено Simulink-модель імітаційного комп'ютерного моделювання мобільності колісних машин. Розроблену Simulink-модель розрахунку

параметрів мобільності зразка колісної БАТ бездоріжжям у програмному середовищі MATLAB Simulink на базі залежностей (1–5) наведено на рис. 4.

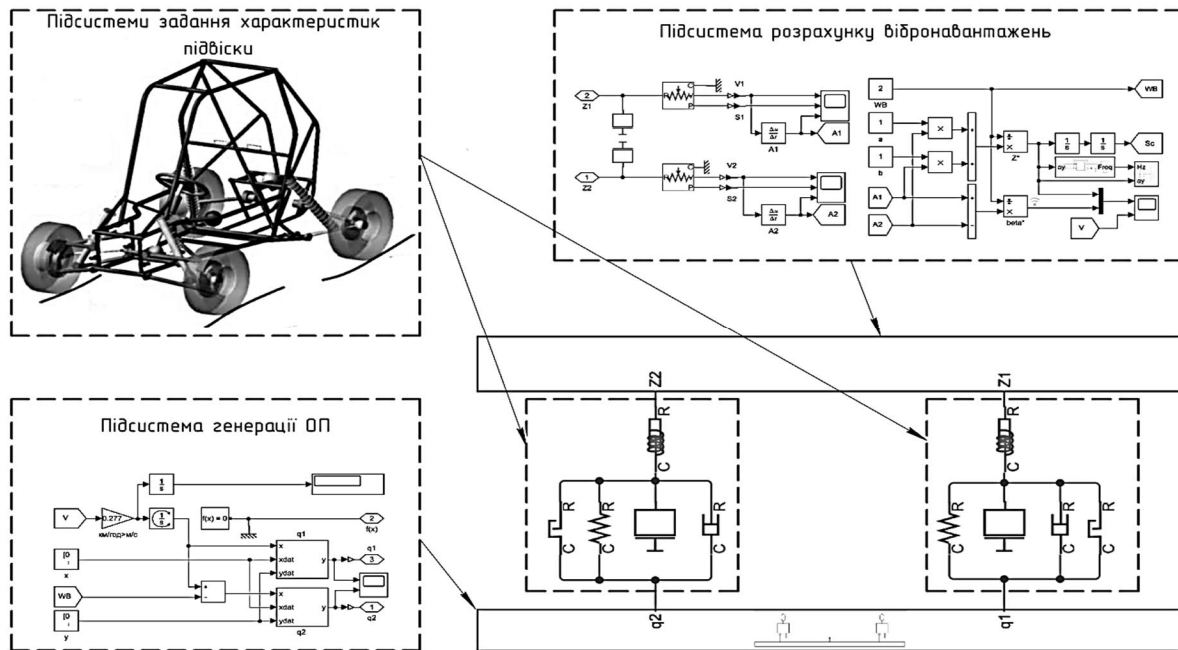


Рис. 4. Блок-схема розрахунку мобільності зразка колісної БАТ бездоріжжям у програмному середовищі MATLAB Simulink

Наведена комп'ютерна Simulink-модель передбачає можливість зміни (підбору) пружно-демпфуючих характеристик підвіски та шин на конкретно заданих типах бездоріжжя. Крім того, вона дозволяє виконувати розрахунок-оцінку відповідного рівня віброколивних навантажень при різних швидкостях руху, включаючи оцінку досягнення максимально допустимого їх значення.

З метою оцінки адекватності опрацьованої моделі мобільності зразка колісної БАТ з колісною формулою 4x4 бездоріжжям, за прототип обрано автомобіль, який використовувався при проведенні експерименту в роботі [10]. Для цього використано характеристики підвіски, шин та загалом коливної системи, що впливають на забезпечення плавності руху зазначеного зразка.

У роботі [10] представлена розробка моделі ADAMS та подальше експериментальне тестування прототипу (рис. 5) масою 165 кг, обладнаного незалежною підвіскою.

Автомобіль має передню підвіску на подвійних поперечних важелях і задню на поздовжніх важелях. Передня й задня підвіски оснащені пневматичним амортизатором FOX. Крім цього, у задній підвісці також є камера EVOL ("додатковий об'єм") і регулятор відскоку. Хід підвіски обмежено до 200 мм.

Транспортний засіб оснащений шинами 22x7-10 BKT W207 ATV на всіх чотирьох колесах, але переднє колесо має більшу масу завдяки гальміновому

вузлу. Крім того, шини мають низький тиск накачування (зазвичай 7 psi, що складає $\approx 0,05$ МПа), мають низьку жорсткість та високу амортизацію порівняно зі звичайними комерційними шинами.

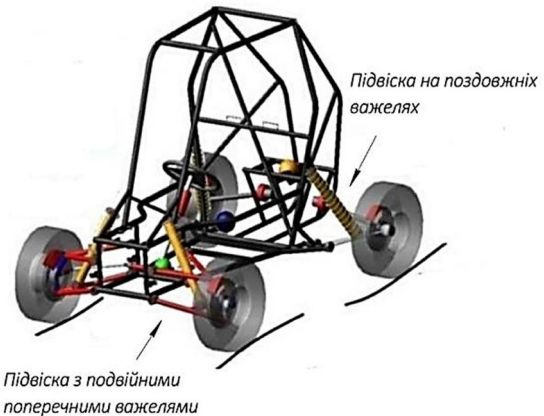


Рис. 5. Прототип автомобіля з незалежною підвіскою зразка колісної БАТ з колісною формулою 4x4

Короткі технічні характеристики прототипу автомобіля з колісною формулою 4x4 наведені в табл. 1.

На рис. 6 наведено результати оцінки вертикальних та поздовжніх віброприскорень, максимально допустимої швидкості руху прототипу зразка колісної БАТ з колісною формулою 4x4 по ОП типу "Бельгійська бруківка" з умов плавності роботи підвіски.

Таблиця 1

Короткі технічні характеристики прототипу автомобіля з колісною формулою 4x4

№ з/п	Назва параметра	Значення
1.	Споряджена маса, кг підресорена, кг непідресорена, кг	220 165 55
2.	Підресорені маси, що припадають на: передню вісь, кг задню вісь, кг	70 95
3.	Непідресорені маси, що припадають на: передню вісь, кг задню вісь, кг	30 25
4.	Сумарна вертикальна жорсткість підвіски: передньої осі, Н/м задньої осі, Н/м	50000 30000
5.	Сумарний коефіцієнт демпфування підвіски: передньої осі, Н/(м/с) задньої осі, Н/(м/с)	3000 2720
6.	Сумарна вертикальна жорсткість шин: передньої осі, Н/м задньої осі, Н/м	80000 50000
7.	Сумарний коефіцієнт демпфування шин: передньої осі, Н/(м/с) задньої осі, Н/(м/с)	400 400
8.	Висота центру мас над поверхнею дороги, м	0,580
9.	Відстань від центру мас до: передньої осі, м задньої осі, м	1,0 1,0
10.	Колісна база, м	2,0

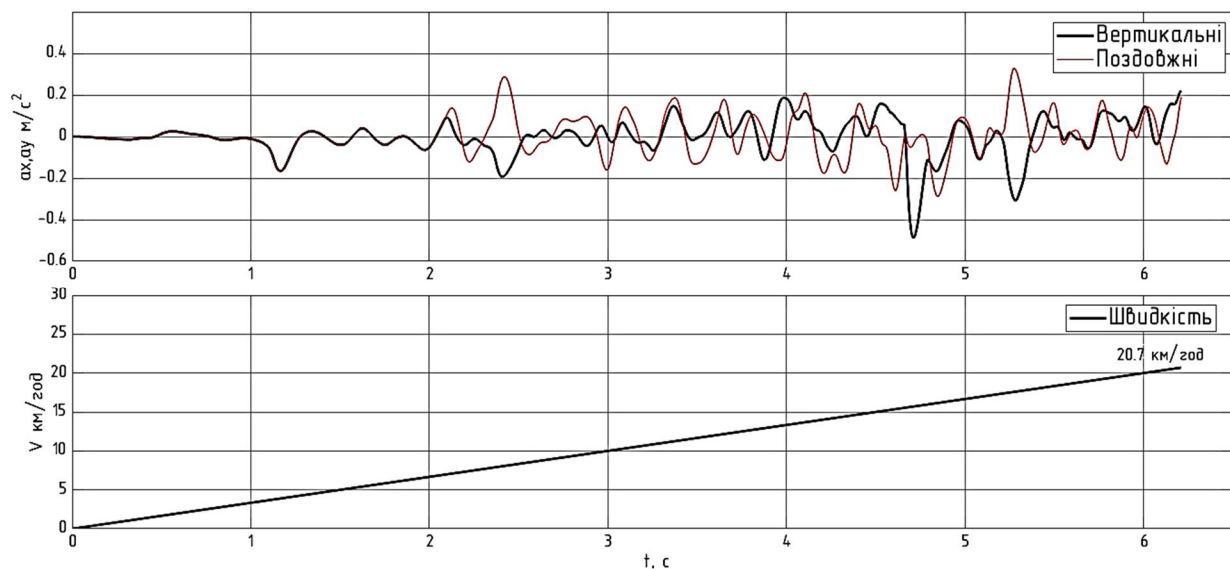


Рис. 6. Віброприскорення та максимально допустима швидкість руху прототипу зразка колісної ВАТ з колісною формулою 4x4

Таким чином, з метою якісної оцінки отриманих у процесі моделювання результатів (рис. 6) варто зазначити наступне:

вертикальні та повздовжні віброприскорення є майже однаковими – це пояснюється короткою колісною базою прототипу;

обмеження швидкості відбувається при зміні віброприскорення на максимально допустиму величину;

спостерігається ділянка тимчасового зменшення вібронавантажень на вищій швидкості, оскільки підвіска пропускає малі перепади висот мікропрофілю.

Висновки

У статті розроблена імітаційна Simulink-модель руху бездоріжжям зразка колісної ВАТ яка, на відміну від відомих, дозволяє врахувати вплив параметрів шин, підвіски та в загальному коливної системи на плавність його руху. Це дозволяє оцінювати віброколивні навантаження на водія та екіпаж зразка колісної ВАТ при його русі різними типами ОП, у тому числі бездоріжжям із різними технічно можливими швидкостями.

Розроблена Simulink-модель дозволяє визначати швидкості руху, що відповідають граничним, пороговим значенням віброколивних навантажень на організм людини при відомій тривалості руху. Це формує гранично допустиму максимальну швидкість руху зразка колісної ВАТ, що і є основою мобільності ВАТ на бездоріжжі.

За результатами моделювання прототипу зразка колісної ВАТ з колісною формулою 4x4 отримано порогове значення максимальної швидкості руху – 20,7 км/год. При русі з цією швидкістю віброприскорення, що діють на водія та екіпаж, знаходяться в допустимих межах згідно з [13]. Зазначене вище дозволяє обирати раціональні швидкості руху з метою мінімізувати негативний вплив віброприскорень на самопочуття водія й екіпажу, а також забезпечити можливість виконувати бойові завдання при русі цією ОП.

Список літератури

1. Timoney E.P., Timoney S.S. and Timoney S.G., (1988) [Heavy vehicle independent suspension], *Proceeding of the IMechE, "Advanced Suspensions"*, C434/88, P. 125–133.
2. Манзяк М.О., Крайник Л.В., Грубель М.Г. Тенденції розвитку конструкцій підвісок військових автомобілів. *Науково-технічний журнал "Системи озброєння і військова техніка"*. Харків, 2021. №1(65). С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.65.04> (дата звернення: 02.03.2023).
3. Pyper, M., Schiffer, W., Schneider, W., ABC – Active Body Control: Von der Blattfederung zum aktiven System für mehr Fahrsicherheit und Fahr komfort. *Velog Moderac Industric, Lanolsberg*. 2003. 236 p.
4. Дущенко В.В. и др. Колебания в транспортных машинах : монографія, під ред. Александров Е.Е. Київ: ВІПОЛ, 1996. 256 с.
5. Defence Standard 23-06 Issue 4, TECHNOLOGY GUIDANCE FOR MILITARY LOGISTICS VEHICLES URL:<https://standards.globalspec.com/std/244958/DEF%20S-TAN%2023-6> (дата звернення: 02.03.2023).
6. Standard for Ground Vehicle Mobility. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Standard-for-GroundVehicle-Mobility-Baylot-Gates/7afb27a8fb14341694553d985fcc5ba1741d599f> (дата звернення: 02.03.2023).

7. Слюсар В.І. Нові можливості оперативної оцінки мобільності техніки в операціях сухопутних військ. Науково-практична конференція “Актуальні проблеми застосування Збройних Сил України, управління ними, їх оперативного та матеріально-технічного забезпечення”. 17-18 вересня 2019 р., Київ, ЦНДІ ЗСУ. URL: http://www.slyusar.kiev.ua/CNDL_2019_2.pdf (дата звернення: 02.03.2023).

8. Грубель М.Г., Крайник Л.В., Хома В.В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Науково-виробничий журнал "Автомобілярик України"*. № 2. 2020. С. 21–28. DOI:10.30748/soivt.2019.60.01

9. Els Schalk, Theron N., Uys Petro, Thoresson Michael. The ride comfort vs. handling compromise for off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*. 2007. № 44. pp. 303–317. DOI:10.1016/j.jterra.2007.05.001 (дата звернення: 02.03.2023).

10. H. Kanchwala, A. Chatterjee, Adams model validation for an all-terrain vehicle using test track data. *Advances in Mechanical Engineering*. № 11, 2019. DOI: 10.1177/1687814019859784 (дата звернення: 02.03.2023).

11. Belgian block road sample of Daimler durability test track. URL: <http://maps.google.com/maps?&q=48.7860,9.2331> (дата звернення: 02.03.2023).

12. Open CRG. URL:<http://www.opencrg.org/> (дата звернення: 02.03.2023).

13. ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements, 1997. 36 p. URL: <https://www.iso.org/standard/7612.html> (дата звернення: 02.03.2023).

Reference

1. Timoney E.P., Timoney S.S. and Timoney S.G. (1988), Heavy vehicle independent suspension. *Proceeding of the IMechE, "Advanced Suspensions"*, C434/88, pp. 125–133.
2. Manzyak M.O., Kraynyk L.V. and Hrubel' M.H. (2021), “Tendentsiyi rozvytku konstruktivnykh pidvisok viys'kovykh avtomobiliv” [Trends in the development of military vehicle suspension designs.]. *Scientific and technical magazine "Weapon systems and military equipment"*. Kharkov, Issue 1(65). pp. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.65.04> (Accessed 2 March 2023). [in Ukrainian]
3. Pyper M., Schiffer W. and Schneider W. (2003), ABC – Active Body Control: Von der Blattfederung zum aktiven System für mehr Fahrsicherheit und Fahr komfort. *Velog Moderac Industric, Lanolsberg*. 236 p.
4. Dushchenko V.V. and etc. (1996), "Kolebaniya v transportnykh mashynakh" [Vibrations in transport vehicles: monograph] : monohrafy, red. Aleksandrov E.E. Kyiv: VIPOL, 256 p. [in Russian]
5. Defence Standard 23-06 Issue 4, TECHNOLOGY GUIDANCE FOR MILITARY LOGISTICS VEHICLES URL:<https://standards.globalspec.com/std/244958/DEF%20S-TAN%2023-6> (Accessed 2 March 2023).

6. Standard for Ground Vehicle Mobility. URL:<https://www.semanticscholar.org/paper/Standard-for-GroundVehicle-Mobility-Baylot-Gates/7a6b27a8fb14341694553d985fcc5ba1741d599f> (Accessed 2 March 2023).
7. Slyusar V.I. (2019), "Novi mozhlivosti operativnoyi otsinky mobil'nosti tekhniky v operatsiyakh sukhoputnykh viys'k" [New opportunities for operational assessment of equipment mobility in ground forces operations]. Scientific and practical conference "Actual problems of the use of the Armed Forces of Ukraine, their management, their operational and logistical support". September 17-18. Kyiv, Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine. URL:http://www.slyusar.kiev.ua/CNDI_2019_2.pdf (Accessed 25 May 2023). [in Ukrainian]
8. Grubel M. G., Kraynyk L. V. and Khoma V. V. (2020), "Imitatsiynе modelyuvannya rukhu kolisnoyi viys'kovoyiavtomobil'noyi tekhniky bezdorizhzhiam ta otsinka yohoadekvatnosti" [Imitation modeling of wheeled vehicula rautomotive equipment for off-road vehicles and assessment ofits adequacy]. *Scientific and industrial magazine "Automobile of Ukraine"*. Kyiv. Issue 2. pp. 21–28 DOI:10.30748/coibT.2019.60.01 (Accessed 4 May 2022). [in Ukrainian].
9. Els Schalk, Theron N., Uys Petro and Thoreson Michael. (2007), The ride comfort vs. handling compromise for off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*. № 44. pp. 303–317. DOI:10.1016/j.jterra.2007.05.001 (Accessed 2 March 2023).
10. H. Kanchwala and A. Chatterjee. (2019), Adams model validation for an all-terrain vehicle using test track data. *Advances in Mechanical Engineering* 11, 1687814019859784. DOI: 10.1177/1687814019859784 (Accessed 2 March 2023).
11. Belgian block road sample of Daimler durability test track. URL: <http://maps.google.com/maps?q=48.7860,9.2331> (Accessed 2 March 2023).
12. Open CRG. URL:<http://www.opencrg.org/> (Accessed 2 March 2023).
13. ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements, 1997. 36 p. URL: <https://www.iso.org/standard/7612.html> (Accessed 2 March 2023).

MOBILITY SIMULATION MODELLING OF WHEELED MILITARY VEHICLES UNDER OFF-ROAD TRAFFIC CONDITIONS

M. Hrubel, A. Manziak, O. Lanets, V. Khoma, A. Andriienko

Ensuring the mobility of military vehicles (MV) is especially urgent in the conditions of modern hybrid wars and determines the growth of requirements for their designs. The influence of cross-country ability indicators, suspension and tire characteristics on limiting the maximum possible off-road speeds was analyzed. It is shown to limit the maximum speeds depending on the maximum permissible values of the vibrational loads level on the human body, disturbed by irregularities, the off-road micro-profile and the corresponding transmission functions of the suspension and tires.

An analysis of literary sources, as well as standards regarding the methods of evaluating the movement mobility, determining the limit vibrational loads from the point of view of limiting the maximum speed of movement of the MV sample, was carried out. To study the influence of the suspension on the vibro-oscillatory properties of the MV sample, taking into account that vertical vibrations are the determining factors in the formation of vibro-oscillatory loads (the specific significance of longitudinal and transverse vibrations in total is within 20%), a dynamic equivalent model adequate to the physical process was built for a car with a 4x4 wheel formula. According to the specified model, the structure of simulated computer modeling of the wheeled vehicles movement in the MATLAB Simulink software environment was worked out.

The possibility and parameters of the deterministic setting of the heights of irregularities of the off-road micro-profile with the possibility of operational change of both the characteristics of the suspension/tires and the type and condition of the off-road were worked out. Adequacy of the model was previously evaluated by evaluating the degree of reproduction of known experimental studies and determines the feasibility of forming a typical section of the off-road micro-profile for evaluating the effectiveness of the suspension.

Keywords: military vehicles, off-road, vibrations/oscillations, suspension, tires, mobility.