

**М. В. Склярів<sup>1</sup>**  
**І. В. Цебрюк<sup>1</sup>**  
**О. В. Яковлев<sup>1</sup>**  
**С. В. Бондар<sup>1</sup>**  
**А. А. Кашканов<sup>2</sup>**

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ З КОЛІСНОЮ ФОРМУЛОЮ 4×4 ПРИ ЗМІНІ ТИСКУ В ШИНАХ КОЛІС НА ПРИКЛАДІ КРАЗ-СПАРТАН

<sup>1</sup>Національна академія Національної гвардії України

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

Авторами запропоновано дослідження прохідності вантажівок, а також броневих автомобілів Національної гвардії України з колісною формулою 4x4. Рух автобронетанкової техніки (АБТТ) Національної гвардії України передбачає її пересування як дорогами загального користування, так і бездоріжжям. Розглядається можливість підвищення прохідності по пересіченій місцевості шляхом забезпечення оптимального розподілу тиску в шинах коліс. Збільшення опорної прохідності у складних умовах експлуатації можна оцінити за допомогою сучасних математичних інструментів. Це дає змогу автомобільній техніці Національної гвардії України досліджувати прохідність і підбирати оптимальні параметри під час виконання службових і бойових завдань при певному співвідношенні технічних характеристик у різних умовах експлуатації.

Через повномасштабну війну Російської Федерації проти України до автомобільної техніки Збройних сил України (ЗСУ) та Національної гвардії України (НГУ) висуваються більш суворі технічні вимоги, ніж у мирний час.

Серед цих вимог на першому місці стоїть маневреність-керуваність, яка забезпечується завдяки можливостям високошвидкісного пересування по пересіченій місцевості.

Прохідність АБТТ Національної гвардії України формує багато факторів, основними з яких є: тип і якість поверхні, по якій відбувається пересування, тиск у шинах коліс, вага транспортного засобу, порядок проходження маршруту руху колони і т. д.

Центральна система контролю тиску повітря в колісних шинах (СРТПШ) широко використовується в різних варіантах автомобільної техніки з високою інтенсивністю руху, але основним недоліком таких систем є необхідність мінімізувати тиск у шинах для підвищення прохідності по пересіченій місцевості на несучих поверхнях із низькою несучою здатністю. Таке допустиме значення може спричинити зісковзування шини з обода, перегрів або розрив. Це пов'язано з тим, що максимальна швидкість обмежена через ризик відмови системи.

Рекомендується визначити вплив різних факторів, щоб забезпечити необхідний рівень опорної прохідності та проаналізувати її на прикладі броневих автомобілів КРАЗ-СПАРТАН із колісною формулою 4×4.

**Ключові слова:** автобронетанкова техніка, взаємодія коліс з опорною поверхнею, система регулювання тиску повітря в шинах коліс, прохідність, умови експлуатації, математичне моделювання.

### Вступ

Прохідність – це один з основних показників автобронетанкової техніки (АБТТ) багатопільового призначення, який характеризує її здатність до швидкого переміщення при виконанні службово-бойових завдань у різних умовах експлуатації. Такі визначники прохідності, як рухомість, маневреність, масово-габаритні та тягово-швидкісні властивості, визначають технічний рівень техніки Національної гвардії України. Забезпечення необхідного рівня прохідності дасть змогу покращити показники ефективності АБТТ: середню швидкість руху, паливну економічність, керуваність, стійкість, опорну прохідність тощо.

Компонування автомобіля визначає геометричні фактори прохідності автомобіля, залежить від схеми розміщення коліс, типу несучої частини і компонуванняльної схеми автомобіля. Ці конструктивні складові компонування автомобіля забезпечують здатність долати профільні перешкоди, пристосованість до витягування і самовитягування при застряганні, маневреність машини, доцільний розподіл ваги і його перерозподіл у процесі руху, оптимальне розташування центру тяжіння.

Схема і конструкція трансмісії автомобіля визначає витрати потужності на плавність зміни моменту, що підводиться до ведучих коліс, повноту використання зчеплення колісного рушія (КР) із ґрунтом опорної поверхні і на буксування автомобіля.

Здатність руху АБТТ по бездоріжжю та ступінь прохідності забезпечує конструкція ходової частини автомобіля (підвіска і КР). Підвищення прохідності АБТТ можливе шляхом досягнення граничного рівня прохідності на основі конструктивних рішень. Для АБТТ головною складовою частиною КР є шина, яка і зумовлює його прохідність.

**Актуальність проблеми.** Параметри взаємодії колеса з опорною поверхнею залежать від якісного стану ґрунтової основи [1], але при забезпеченні оптимального співвідношення геометричних параметрів можна значно збільшити силу тяги [2].

Рух АБТТ поза шляхами загального призначення (ШЗП) відбувається з проковзуванням коліс по ґрунту. Цей процес супроводжується або повним руйнуванням ґрунту, або частковим зрушенням верхнього шару в зоні контакту. Відсутність ущільнення ґрунту опорної поверхні при русі АБТТ є причиною значного зниження опорної реакції ґрунту, заглиблення коліс у ґрунт, виникнення буксування. Це явище характерне для шин із недостатньою площею контакту з опорною поверхнею та може виникати при номінальному тиску в шині. Зниження тиску повітря в шинах АБТТ до оптимального для конкретного типу ґрунту сприяє зменшенню опору руху, підвищує зчіпні властивості КР і конструктивно передбачене застосуванням на АБТТ систем регулювання тиску повітря в шинах (СРТПШ).

Наявність на автомобілі такої системи дає змогу:

- під час подолання важкопрохідних ділянок місцевості і при русі в складних дорожніх умовах підвищувати прохідність автомобіля, змінюючи в ході руху тиск повітря в шинах і доводячи його до відповідності вимогам дорожніх умов;
- здійснювати автомобільну рух до місця стоянки без зміни колеса при проколі шини (при цьому витік повітря заповнюється накачуванням);
- здійснювати контроль над тиском повітря в шинах і своєчасно доводити його до необхідної величини, збільшуючи довговічність шин.

**Мета дослідження.** Виконати теоретичне дослідження на базі математичного моделювання з метою підвищення прохідності руху автомобільної та броньованої автомобільної техніки НГУ з колісною формулою 4×4 за рахунок регулювання тиску повітря між осями коліс, при їх русі по поверхням зі змінними коефіцієнтами опору руху та зчеплення коліс.

### Основна частина

**Узагальнені висновки попередніх досліджень.** Важливе значення у визначенні ефективності використання АБТТ у різних сферах людської діяльності має її прохідність. При цьому багатьма авторами [3–8] приділяється значна увага вивченню різних факторів, що характеризують автомобіль як транспортний засіб і впливають на експлуатаційні властивості, які визначають здатність і можливість його руху по дорогах, при погіршених дорожніх умовах і поза дорогами долати різні перешкоди природного і штучного походження. Методи аналізу прохідності автотранспортних засобів багатоцільового призначення при русі зі змінами параметрів тиску повітря в шинах ведучих коліс у різних умовах експлуатації наведено в [5].

В основу математичної моделі прямолінійного руху АБТТ по деформованій опорній поверхні (ДОП) і подальше визначення параметрів цього руху (показників опорної прохідності) покладено результати моделювання руху автомобіля, опубліковані авторами в роботах [5, 8, 9, 10].

У математичній моделі руху АБТТ по ДОП прийняті допущення:

- розглядається прямолінійний рух АБТТ по рівній опорній основі;
- лівий і правий борти рухаються в однакових умовах;
- сліди коліс по бортах автомобіля в усіх мостів (осей) повністю збігаються;
- параметри опорної поверхні по бортах автомобіля однакові;
- у вертикальній площині зв'язок коліс із кузовом автомобіля не враховує пружних властивостей підвіски (жорсткий);
- поздовжня податливість напрямних елементів підвіски підлягає врахуванню;
- безпосередньо на колесо впливає крутний момент двигуна;
- не враховуються пружні та демпферні властивості елементів трансмісії;
- деформація ґрунту задається як питомі втрати енергії при коченні колеса по рівній основі;
- двигун без затримки реагує на зміну положення органу подачі палива;

- характеристика крутного моменту, що розвивається двигуном, прийнята у вигляді похилої прямої, максимальне значення якої визначається частками зміни положення органу подачі палива.

Відповідно, при прямолінійному русі без урахування косоугору (плоска схема) та поздовжнього похилу на АБТТ діють нормальні реакції ( $R_{zi}$ ) з боку опорної поверхні зі зміщенням по осі  $OX$  та поздовжні ( $R_{xi}$ ) реакції в контактні коліс із ґрунтом зі зміщенням по осі  $OZ$ , а з іншого боку (без урахування нахилу корпусу АБТТ до опорної поверхні) – вага автомобіля ( $G_a$ ), яка зосереджена у центрі ваги і діє нормально до опорної поверхні та діючи на висоті центру парусності та тягово-зчіпного пристрою відповідно до сили лобового опору повітря ( $P_e$ ) та тяги на гаку ( $P_{KP}$ ). При контактуванні корпусу автомобіля чи балок його мостів із ґрунтом з'являються поздовжні сили бульдозерного опору ґрунту  $P_{mi}$ . Ці сили можна вважати прикладеними на рівні осей мостів (колес).

Тут рівняння прямолінійного руху автомобіля має вигляд [3]:

$$m_a \cdot \dot{V}_{XC} = 2 \sum_{i=1}^n P_{Xi} - \left( m_a g \cdot [f \cdot \cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta) + P_{KP} + P_B + \sum P_{mi}] \right). \quad (1)$$

Динаміка руху коліс описується рівняннями [3, 4]:

$$J_{ki} \cdot \dot{\omega}_{ki} = M_{ki} - (I - S_{\sigma i}) \cdot (f_{wi} + \phi_i) \cdot R_{zi} \cdot r_{ko}, \quad (2)$$

$$m_{ki} \cdot \dot{V}_{Xki} = \phi_i \cdot R_{zi} - P_{zi} - m_{ki} \cdot g \cdot \sin(\alpha + \beta). \quad (3)$$

Кут  $\beta$  визначається [4]:

$$\beta = \arcsin \frac{H_n - H_1}{L}, \quad (4)$$

де  $H_n$  – глибина колії після проходу АБТТ;  $H_1$  – глибина колії після першого проходу ведучих коліс;  $L$  – база АБТТ.

Прирошення глибини колії визначається [3]:

$$H_i = \left( \frac{2R_{zi}}{k_{HPwi} \cdot c_i \cdot B \sqrt{2r_k} \cdot \left( 2 - \frac{13}{15} \mu + \frac{1}{5} \mu^2 \right)} \right)^{\frac{1}{\mu+0.5}}, \quad (5)$$

де  $\mu$  – показник ступеня, який характеризує закон зміни супротиву вдавненню ґрунту;  $B$  – ширина профілю шини;  $R_{zi}$  – вертикальна реакція  $i$ -го колеса АБТТ;  $k_{HPwi}$  – коефіцієнт, який враховує вплив тиску повітря на деформацію ґрунту [3];  $c_i$  – коефіцієнт пропорційності (показник, що характеризує початковий супротив ґрунту вдавненню штампа), для передніх коліс  $c_1 = c_0$ , для наступних –  $c_i = c_{i-1} \cdot H_{i-1}^\mu$ ;  $H_i$  – коефіцієнт ущільнення ґрунту, чисельно рівний прирошенню глибини колії.

Сила, яка діє на корпус АБТТ з боку колеса по осі  $X$  [3, 4]:

$$P_{Xi} = (X_{Ki} - Q_{Ki}) \cdot C_{nidv} + (V_{XKi} - V_{XC}) \cdot B_{nidv}, \quad (6)$$

де  $C_{nidv}$  – коефіцієнт жорсткості підвіски у поздовжньому напрямі;  $B_{nidv}$  – коефіцієнт демпфування підвіски у поздовжньому напрямі;  $X_{Ki}$  – відстань від центра мас до осі колеса по осі  $X$ ;  $Q_{Ki}$  – відстань від центра мас до точки кріплення підвіски по осі  $X$ ;  $V_{XC}$  – швидкість центра мас АБТТ.

При визначенні характеристик взаємодії колісного рушія з опорною поверхнею, що деформується, коефіцієнт зчеплення колеса з опорною поверхнею, який визначає тягу в плямі контакту, визначається за залежністю (7)

$$\phi = \text{Sign}(S_\sigma) \cdot \phi_{\max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{|S_\sigma|}{S_0}} \right), \quad (7)$$

де  $S_\sigma$  – коефіцієнт буксування колеса;  $\phi_{\max}$  – максимальне значення коефіцієнта сили зчеплення колеса з опорною поверхнею;  $S_0$  – константа.

Функціональна залежність коефіцієнта супротиву описується рівнянням:

$$f_{w0i} = (k_0 + k_1 \cdot P_{wi} + k_2 \cdot R_{Zi} + k_3 \cdot n_i + k_4 \cdot P_{wi} \cdot R_{Zi} + k_5 \cdot P_{wi} \cdot n_i + k_6 \cdot R_{Zi} \cdot n_i + k_7 \cdot P_{wi} \cdot R_{Zi} \cdot n_i)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

де  $k_0 \dots k_7$  – коефіцієнти корекції коефіцієнта супротиву коченню.

Коефіцієнти супротиву коченню  $f_{w0i}$  у введеному режимі з номінальним навантаженням та тиском повітря в шині, а також значення коефіцієнтів корекції коефіцієнта супротиву кочення  $k$  були визначені за рекомендаціями [5, 7, 9, 10]. Графічні залежності деяких показників прохідності наведені в роботі.

Отже, зміна тиску повітря в шинах підвищує можливість автомобіля до руху залежно від дорожніх умов, дорожнього покриття, типу ґрунту, природно-кліматичних умов.

**Математична модель руху автобронетанкової техніки з колісною формулою 4×4 по деформованій опорній поверхні, з урахуванням конструктивних факторів.** Розглянемо АБТТ з колісною формулою 4×4, тобто таку, яка має два ведучих мости (рис. 1–3).



Рис. 1. КрАЗ-5233 ВЕ «Спецназ»

КОНКУРЕНТИ KRAZ HULK			
Україна	Ізраїль	Канада	США
<b>KRAZ HULK</b>	<b>IMI WILDCAT</b>	<b>TEXTRON TAPV</b>	
<b>ПОТУЖНІСТЬ ДВИГУНА (К.С.)</b>			
310	321	365	
<b>МАКСИМАЛЬНА ШВИДКІСТЬ (КМ/ГОД)</b>			
80	100	105	
<b>ЗАПАС ХОДУ (КМ)</b>			
1000	700	644	

Рис. 2. Порівняння АБТТ із колісною формулою 4×4

Вся АБТТ має експлуатуватися по бездоріжжю, тобто мати високу прохідність, яку разом із конструктивними та експлуатаційними параметрами обов'язково буде забезпечувати система регулювання тиску повітря в шинах коліс (СРТПШ).



Рис. 3. КрАЗ «ШРЕК», «СПАРТАН», «Когуар»

Визначивши основні умови та параметри руху, що описуються в наукових роботах [3, 4], переходимо до складання формульної математичної моделі, яка будується на залежностях (1–8).

Базуючись на формульних залежностях, складаємо математичну модель для означених в роботі [5] умов руху вантажних автомобілів НГУ з колісною формулою 4×4.

Для двовісних броньованих колісних машин (БКМ) НГУ, на прикладі КрАЗ-SPARTAN:

$$R_{z1} + R_{z2} - \frac{G_a \cdot \cos(\alpha + \beta)}{2} = 0. \quad (9)$$

$$G_a \cdot \cos(\alpha + \beta) \cdot X_{ki} - 2(M_{k1} + M_{k2}) + P_{kp} \cdot Z_{TCY} - 4R_{z2} \cdot \left( L - \frac{L_{1-2}}{2} \right) = 0. \quad (10)$$

Спрощена схема трансмісії з диференціальним приводом наведена на рисунку 4.

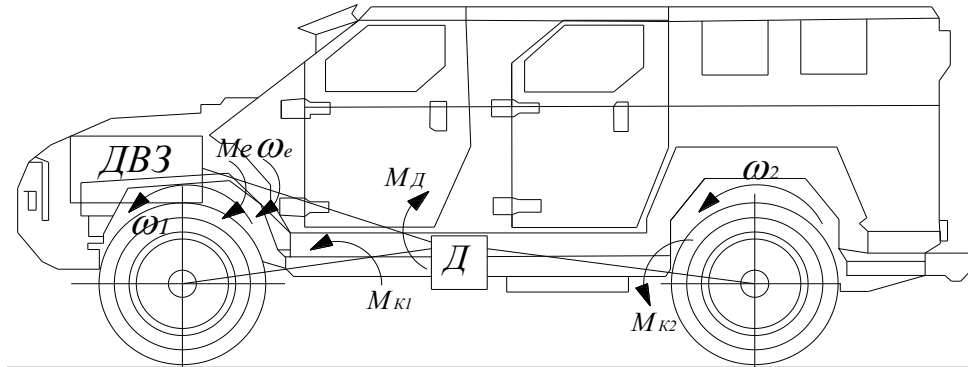


Рис. 4. Схема трансмісії з диференціальним приводом

Для БКМ НГУ з колісною формулою 4×4 (на прикладі КраЗ-Спартан) динаміка трансмісії з диференціальним зв'язком буде описуватися такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_e = 0,5 \cdot \dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2 \\ J_e \cdot \dot{\omega}_e = M_e - M_D \\ J_1 \cdot \dot{\omega}_1 = 0,5 \cdot M_D - M_{k1} \\ J_2 \cdot \dot{\omega}_2 = M_D - M_{k2} \end{cases}, \quad (11)$$

де  $J_i$  – момент інерції  $i$ -го колеса;  $J_e$  – момент інерції двигуна;  $\dot{\omega}_e$  – кутове прискорення обертання валу двигуна;  $M_e$  – момент, який розвиває двигун на вихідному валу коробки передач;  $M_D$  – момент на корпусі диференціалу;  $\dot{\omega}_i$  – кутове прискорення  $i$ -го колеса;  $\dot{\omega}_2$  – кутове прискорення на задній осі;  $M_{ki}$  – момент супротиву на  $i$ -му колесі;  $M_{k2}$  – момент супротиву на задній осі;  $M_B$  – момент блокування.

$$\frac{1}{2} M_{k2-3} = M_{k2} = M_{k3}. \quad (12)$$

Спрощену схему трансмісії з блокованим зв'язком наведено на рисунку 5.

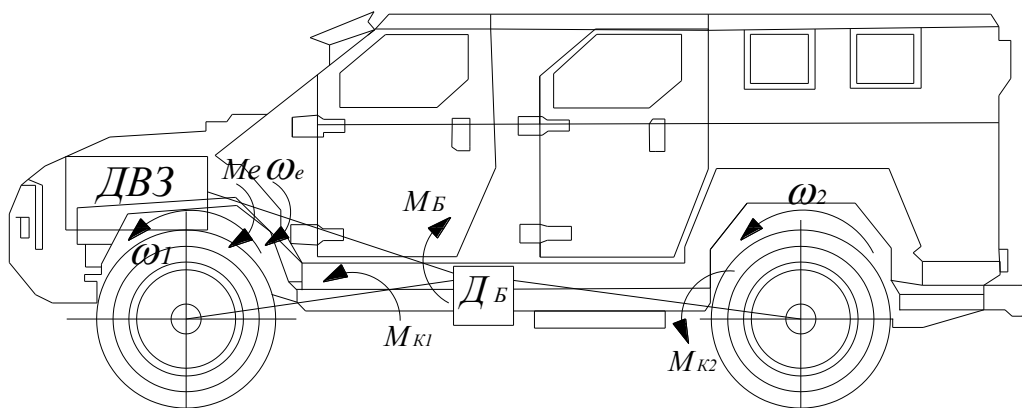


Рис. 5. Схема трансмісії КраЗ SPARTAN із блокованим приводом диференціалів міжосьового та міжколісного

Для ВА НГУ з колісною формулою 4×4 динаміка трансмісії із блокованим зв'язком буде описуватися такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} J_e \cdot \dot{\omega}_e = M_e - M_{\delta} \\ M_{\delta} = M_{K1} + M_{K2} \\ \dot{\omega}_e = \dot{\omega}_1 = \dot{\omega}_2 \end{cases} \quad (13)$$

Математична модель лінійного руху автомобіля із деформованою опорною поверхнею (ОП) і визначення характеристик цього руху (показників довговічності ОП) засновані на моделюванні руху автомобіля, запропонованому авторами в роботах [1–3, 6, 7, 8].

Під час розроблення математичної моделі руху транспортного засобу дорогою необхідно розробити розрахункову схему, що ґрунтується на таких припущеннях:

- розглядається лінійний рух АБТТ по плоскій опорі;
- умови експлуатації з обох боків автомобіля однакові;
- сліди коліс усіх осей з обох боків транспортного засобу ідеально вирівняні;
- характеристики поверхонь контакту з ґрунтом з обох боків транспортного засобу однакові;
- з'єднання між колесами і кузовом автомобіля у вертикальній площині є жорстким (пружні властивості підвіски не враховуються);
- враховується поздовжня пружність напрямних елементів підвіски;
- крутний момент двигуна діє безпосередньо на колеса;
- пружні демпферні властивості елементів трансмісії не враховуються;
- деформація ґрунту задається не безпосередньо як фізична властивість, а як постійна втрата енергії під час кочення коліс рівною основою;
- реакція двигуна на зміну положення паливних форсунок не затримується;
- характеристики крутного моменту, створюваного двигуном, записуються у вигляді похилої лінії, максимальне значення якої визначається малими змінами положення паливних форсунок.

Водночас, якщо навантаження на ліве і праве колеса АБТТ однакове, то замість просторової розрахункової схеми можна використовувати простішу планарну схему, як показано на рисунках 4–5.

Отже, з урахуванням параметрів колісної системи АБТТ, координат центру тяжіння, положення тяг, центру вітрила, типу й характеристик трансмісії та силової установки, властивостей ґрунту, функціональної залежності коефіцієнта опору від тиску повітря в шинах, вертикальних навантажень на колеса і положення коліс АБТТ, розрахунки показують, що практично всі показники лінійного руху АБТТ та відповідні характеристики коліс на деформованій опорній поверхні, зокрема рух АБТТ та рух коліс на деформованій опорній поверхні, є однаковими.

Чисельне моделювання руху АБТТ проводилося з використанням програмного продукту Matlab у пакеті Simulink. Початкові умови:  $\dot{V}_X(t_0) = 0$ ;  $\dot{V}_K(t_0) = 0$ ;  $\dot{\omega}_1 = 0$ ;  $V(t_0) = 7$  м/с. Розрахункові змінні:  $\omega_e$ ;  $M_{Ki}$ ;  $M_{K2-3}$ ;  $M_e$ ;  $M_{\delta}$ ;  $\dot{\omega}_i$ ;  $\dot{\omega}_{2-3}$ ;  $\dot{\omega}_e$ ;  $c_i$ ;  $V_{XC}$ ;  $\beta$ ;  $\dot{V}_{Xki}$ ;  $\omega_{ki}$ ;  $\dot{\omega}_{ki}$ ;  $\phi_i$ ;  $f_{wi}$ ;  $f_{w0i}$ ;  $R_{Zi}$ ;  $S_{\delta}$ ;  $M_{fki}$ ;  $H_n$ ;  $H_1$ ;  $H_i$ .

Реалізація моделі наведена на рисунках 6-13.

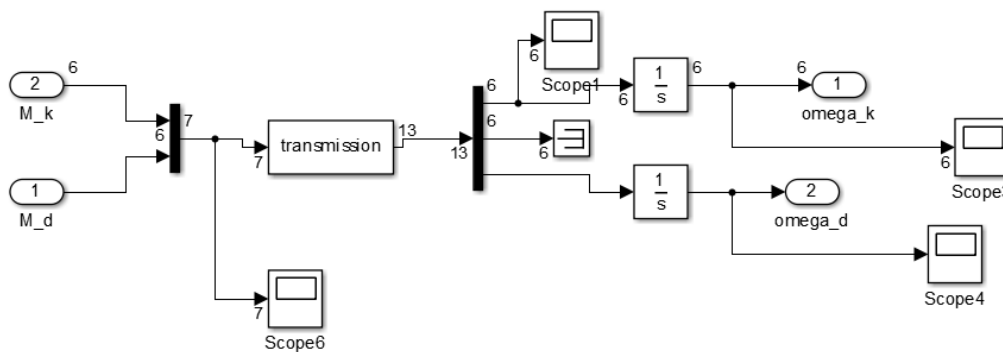


Рис. 6. Блок опису роботи трансмісії

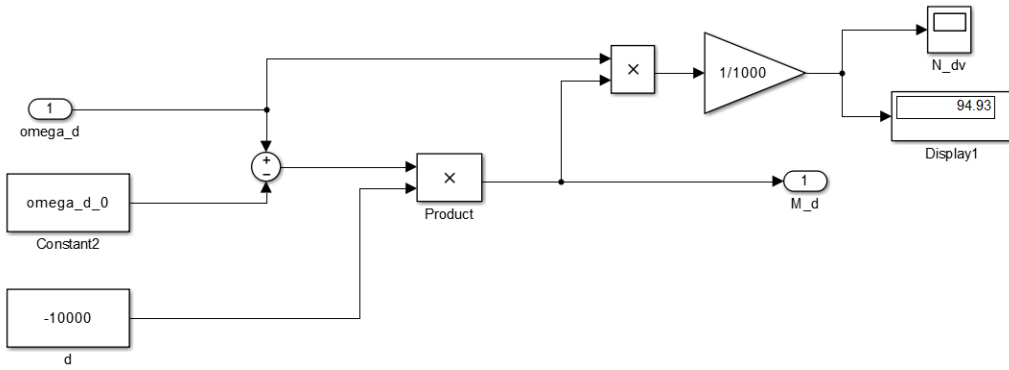


Рис. 7 Блок опису роботи двигуна

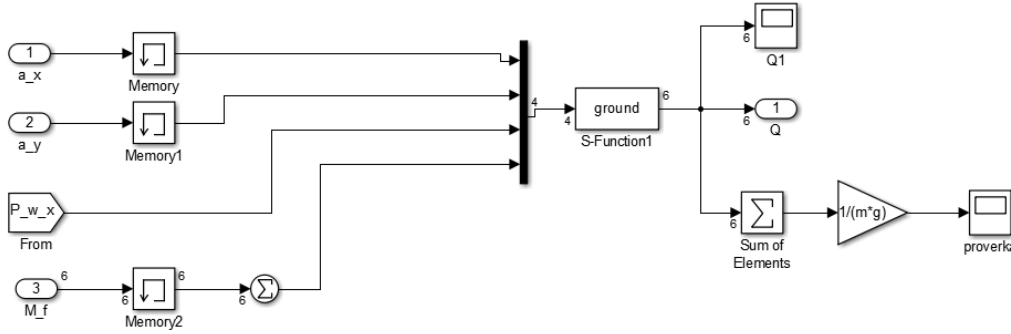


Рис. 8 Блок опису ґрунтової основи опорної поверхні

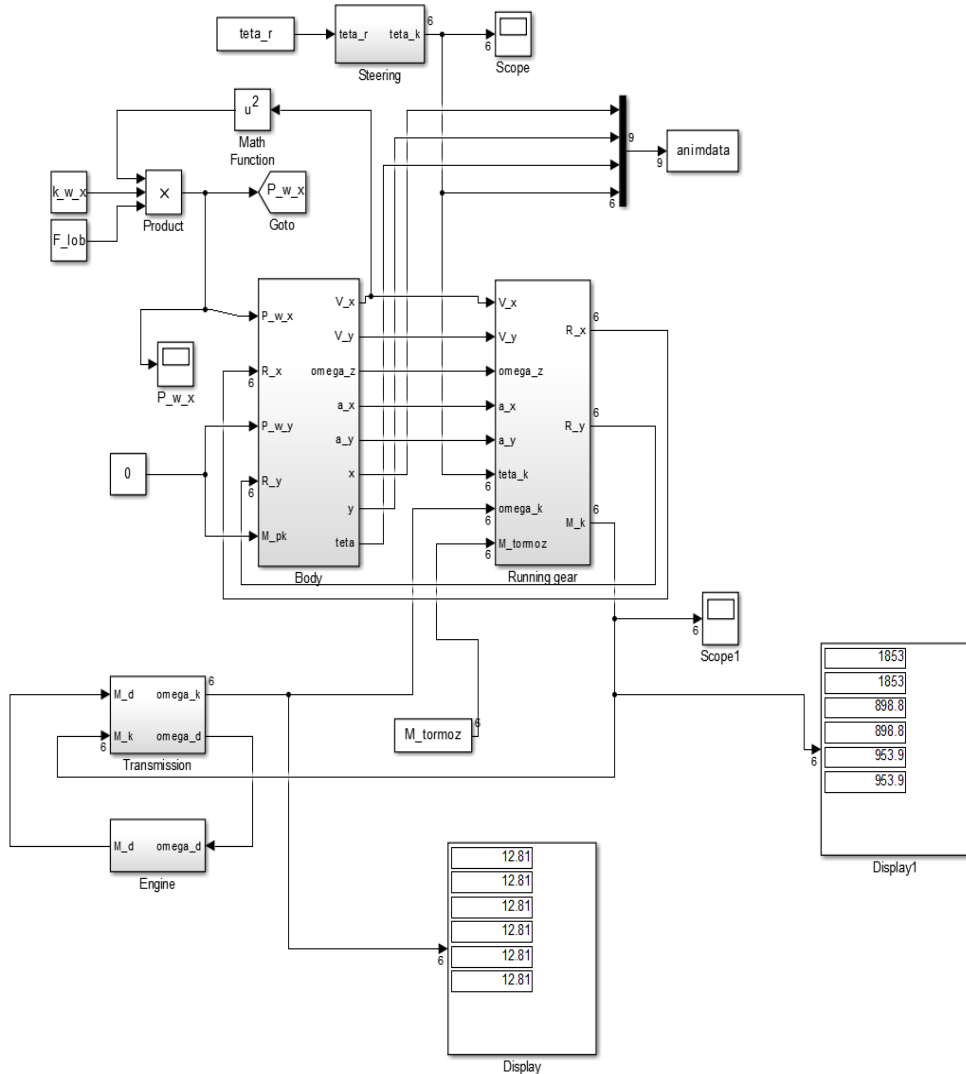


Рис. 9. Блок-схема розробленої математичної моделі, яка містить всі підблоки, відповідно, двигун, трансмісію тощо

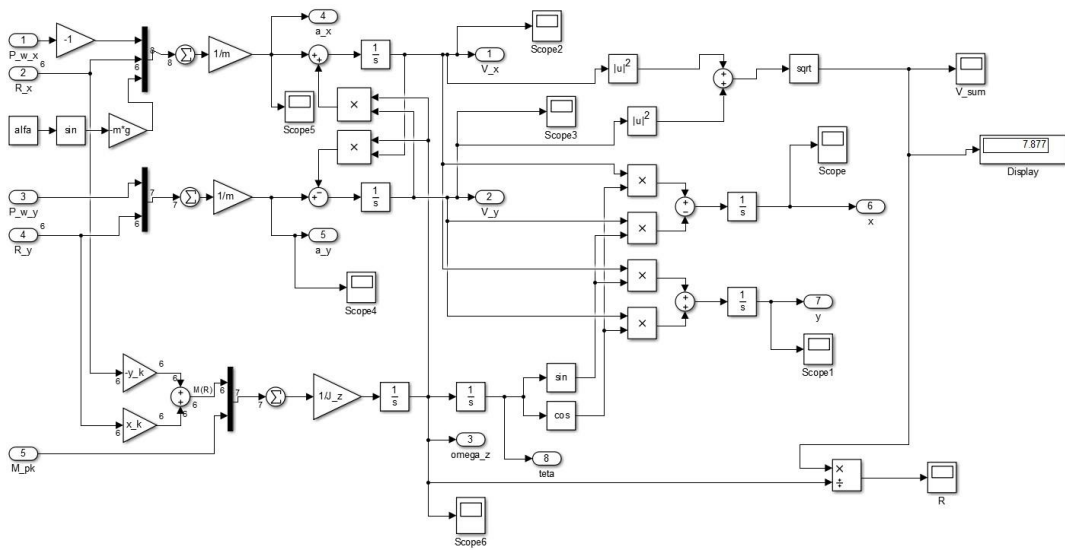


Рис. 10. Блок опису зовнішньої динаміки АБТТ

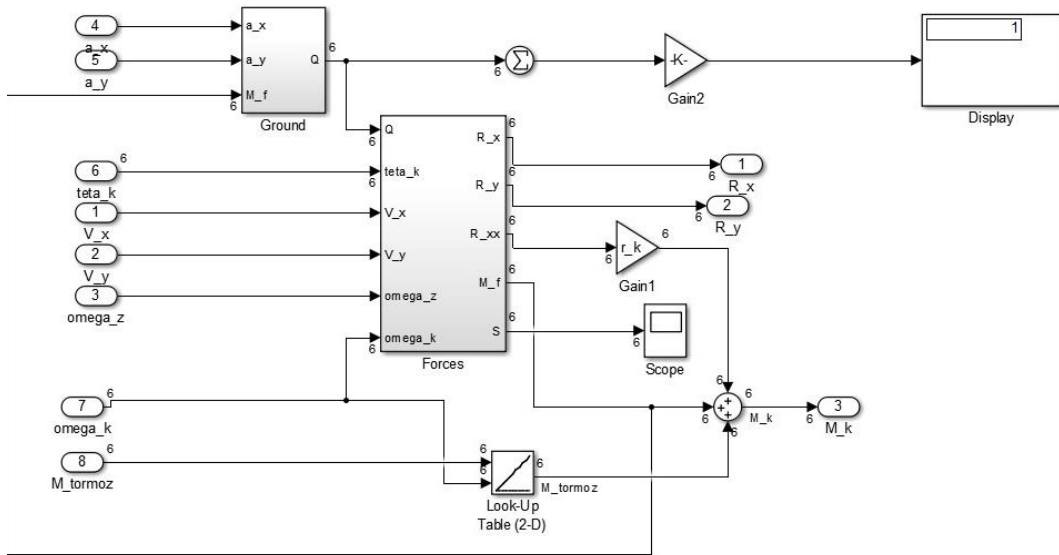


Рис. 11. Блок опису взаємодії колеса з опорною поверхнею

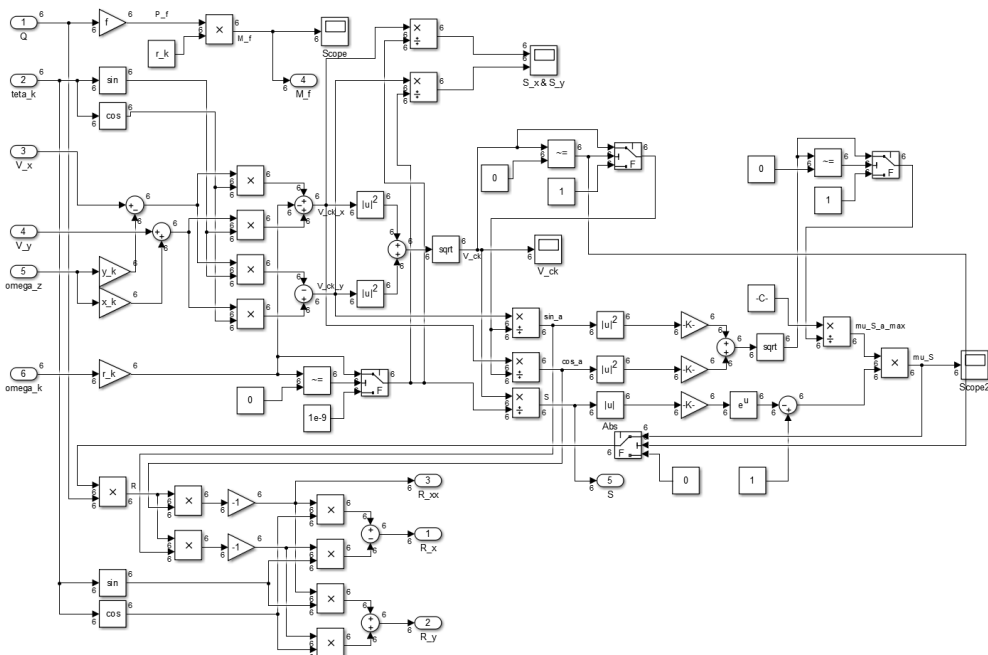
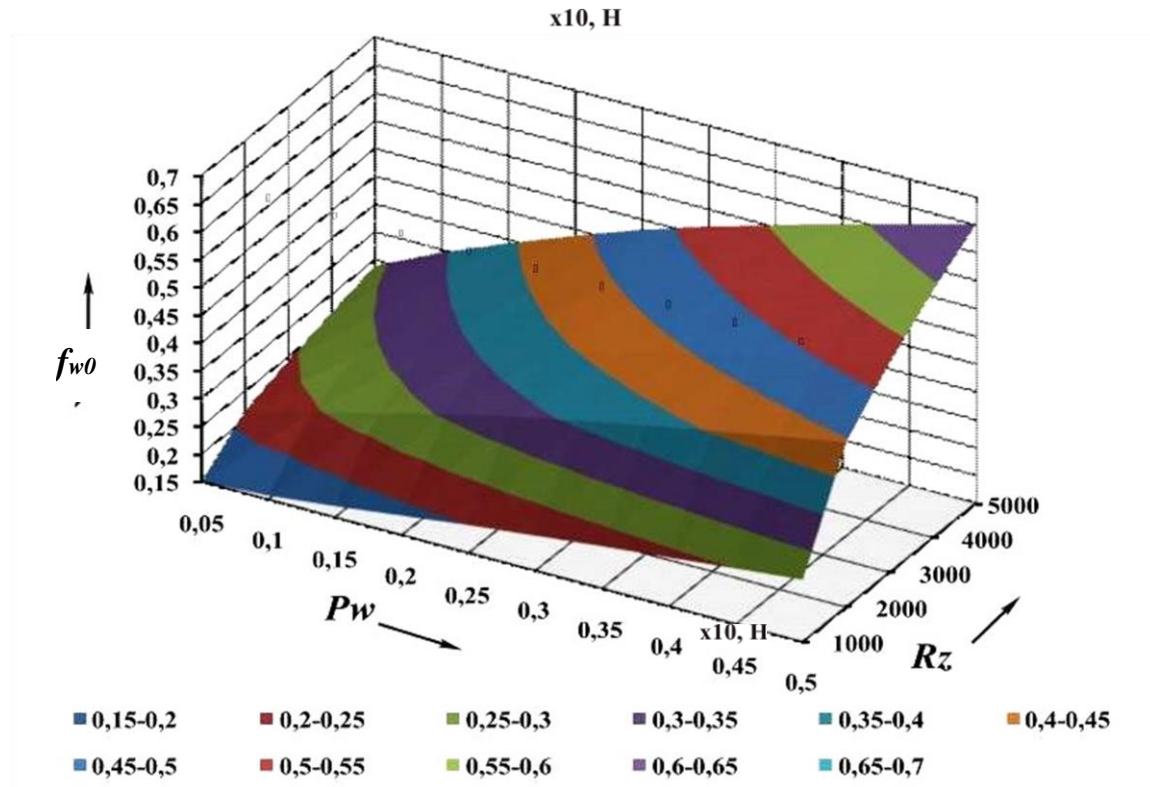


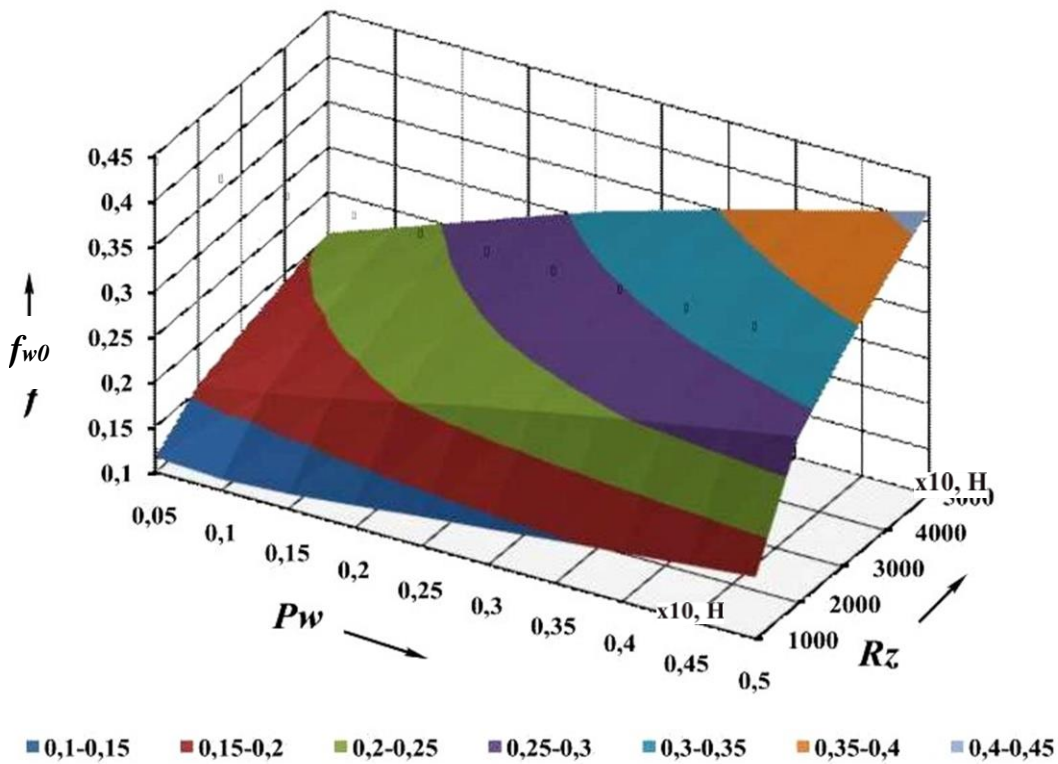
Рис. 12. Блок опису розрахунку опорних реакцій



Інтервали значень раціонального тиску повітря в шинах коліс ( $P_w$ , МПа), відповідні мінімальним значенням коефіцієнту опору коченню, при встановленому навантаженні і залежно від номера проходу коліс по відповідній ґрунтовій основі, представлені в таблиці 1.



a)



b)

Рис. 13. Залежності  $f_{w0}$  у функції від  $R_z$  і  $P_w$  при першому (а) та другому (б) проході колеса по ґрунтовій основі ДОП «рілля»

Оптимальні значення  $P_w$  (МПа) при русі по ДОП «рілля»

$R_z$ , Н	Номер проходу	
	перший	другий
10000	0,05–0,10	0,05–0,10
20000	0,75–0,10	0,8–0,12
30000	0,15–0,20	0,16–0,18
40000	0,2–0,25	0,2–0,25
50000	0,2–0,25	0,2–0,25

Винятком було лише кочення коліс по ґрунтовій основі «Рілля» з навантаженням у 40 000 і 50 000 Н. Тут значення раціонального тиску повітря в шинах знаходяться в інтервалі від 0,2 до 0,25 МПа для двох послідовних проходів із кожним навантаженням.

### Висновки

Авторами проведено моделювання руху повнопривідного автомобіля по бездоріжжю для визначення раціонального розподілу тиску між осями, за якого покращується прохідність та не зберігається ресурс шин.

1. Підвищення прохідності ББА пропонується забезпечити шляхом децентралізованого регулювання тиску повітря в шинах залежно від навантаження коліс та їх розташування в ББА.

2. Застосування СРТПШ модернізованої конструкції дає змогу адаптувати колісний рушій ББА до дорожніх умов шляхом встановлення оптимального тиску повітря в шинах.

3. Розроблено метод оцінювання безпеки та енергоефективності руху багатоцільових броньованих колісних транспортних комплексів по деформованих опорних поверхнях при виконанні службово-бойових завдань (СБЗ) підрозділами Національної гвардії України та Збройними Силами України шляхом математичного моделювання. Особливість методу полягає в можливості дослідження транспортних комплексів із довільним числом ланок при різних конструктивних особливостях зчіпних пристроїв. Використання математичної моделі дає змогу імітувати поведінку ББА в заданих умовах експлуатації і у такий спосіб значно скоротити терміни проектування, доводочних випробувань, а також терміни підготовки до виконання СБЗ і підвищити безпеку та енергоефективність руху.

4. За результатами імітаційного математичного моделювання доведено, що розроблена система забезпечення прохідності в складних дорожніх умовах, заснована на реалізації закону управління індивідуальним приводом рушіїв, що працює за критерієм підтримки максимально можливого значення вільної сили тяги, дає змогу забезпечити рух ББА в складних дорожніх умовах при мінімальних енерговитратах.

Отже, для підвищення прохідності АБТТ, незалежно від колісної формули, є необхідним застосування методу децентралізованого регулювання тиску повітря в шинах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Inertial evaluation of the tyre-road interaction during emergency braking / Kashkanov A. A. et al. *Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series*. 2019. № 2(94). P. 82–91. DOI: 10.31489/2019Ph2/82-91.
- [2] Буренніков Ю. А., Кашканов А. А., Ребедайло В. М. Рухомий склад автомобільного транспорту: робочі процеси та елементи розрахунку: навч. посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 267 с.
- [3] Склярів М. В., Шаповалов О. І. Математичне моделювання руху по деформованій опорній поверхні при зміні тиску в шинах коліс багатоцільового броньованого автомобіля на прикладі КрАЗ «Ураган». *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків: НА НГУ, 2021. Вип. 1(37) С. 78–88.
- [4] Склярів М. В., Нікорчук А. І., Шаповалов О. І. Дослідження прохідності вантажних автомобілів Національної гвардії України з колісною формулою 6×6. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2022. Том. 1. № 39. С. 55–62.
- [5] Склярів М. В., Воробійов С. О. Вплив конструктивних факторів на прохідність автомобільної техніки багатоцільового призначення. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків: НА НГУ, 2020. Вип. 1(35). С. 69–78.
- [6] 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.
- [7] Wong Y. J. *Theory of ground vehicle* London. London–NewYork, Mc-GrawHill Booh Comp., 2013. 423 p.
- [8] Lessem A., Mason G., Ahlvin R. Stochastic vehicle mobility forecasts using the NRMM. *Journal of Terramechanics*. 2016. № 33(6). P. 273–280.

[9] Freitag D. R. A dimensional analysis of the performance of the pneumatic tires soft soil. *US Army Waterways Experimental Station. Report*, 3-688, 2020.

[10] Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications / He R. et al. *Journal of terramechanics*. 2019. № 81(2). P. 3–22

**Склярів Микола Вячеславович** – канд. техн. наук, доцент кафедри автобронетанкової техніки, e-mail: [nvsklyarov@ukr.net](mailto:nvsklyarov@ukr.net)

**Цебрюк Іван Вікторович** – канд. техн. наук, доцент кафедри автобронетанкової техніки, e-mail: [infinity74@ukr.net](mailto:infinity74@ukr.net)

**Яковлев Олексій Вікторович** – старший викладач кафедри автобронетанкової техніки, e-mail: [80973986587@ukr.net](mailto:80973986587@ukr.net)

**Бондар Євгеній Вікторович** – викладач кафедри автобронетанкової техніки, e-mail: [eugeny.bondar@ukr.net](mailto:eugeny.bondar@ukr.net)

Національна академія Національної гвардії України, м. Харків

**Кашканов Андрій Альбертович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, e-mail: [a.kashkanov@vntu.edu.ua](mailto:a.kashkanov@vntu.edu.ua)

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**M. Sklyarov<sup>1</sup>**  
**I. Tsebriuk<sup>1</sup>**  
**O. Yakovliev<sup>1</sup>**  
**Ye. Bondar<sup>1</sup>**  
**A. Kashkanov<sup>2</sup>**

## Mathematical modeling of the movement of an armored vehicle with a 4×4 wheel formula with change of pressure in the wheel tires using the example of through KrAZ-Spartan

<sup>1</sup>National Academy of the National Guard of Ukraine

<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

*The authors proposed a study of the passability of trucks and armored vehicles of the National Guard of Ukraine with a 4x4 wheel formula. The movement of armored vehicles (AMT) of the National Guard of Ukraine involves movement both on public roads and off-road. The possibility of increasing cross-country ability by ensuring optimal pressure distribution in the tires of the wheels is being considered. The increase in bearing capacity in difficult operating conditions can be estimated with the help of modern mathematical tools. This allows the vehicle equipment of the National Guard of Ukraine to study the cross-country ability and select optimal parameters when performing service and combat tasks with a certain ratio of technical characteristics in different operating conditions.*

*As a result of the full-scale war of the Russian Federation against Ukraine, more serious technical requirements are imposed on the vehicles of the Armed Forces of Ukraine (AFU) and the National Guard of Ukraine (NGU) than in peacetime.*

*Among these requirements, maneuverability is in the first place - controllability is ensured by the ability to move at high speed over rough terrain.*

*The patency of the AMT of the National Guard of Ukraine depends on many factors, the main ones of which are: the type and quality of the surface on which movement takes place, the pressure in the tires of the wheels, the weight of the vehicle, the order of passing the route of the convoy, etc.*

*The central air pressure control system in wheel tires (SRPRS) is widely used in various variants of automotive equipment with high traffic intensity, but the main disadvantage of such systems is the need to minimize tire pressure to improve cross-country ability on load-bearing surfaces with low load-bearing capacity. This tolerance can cause the tire to slip off the rim, overheat or burst. This is due to the fact that the maximum speed is limited due to the risk of system failure.*

*It is recommended to determine the influence of various factors in order to ensure the required level of support patency and analyze it using the example of the KrAZ-SPARTAN armored car with a 4x4 wheel formula.*

**Key words:** armored vehicles, interaction of wheels with the supporting surface, air pressure control system in wheel tires, patency, operating conditions, mathematical modeling.

**Sklyarov Mykola** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Armored Vehicles, e-mail: [nvsklyarov@ukr.net](mailto:nvsklyarov@ukr.net)

**Tsebriuk Ivan** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Armored Vehicles, e-mail: [infinity74@ukr.net](mailto:infinity74@ukr.net)

**Yakovliev Oleksii** – Senior Lecturer of the Department of Armored Vehicles, e-mail: [80973986587@ukr.net](mailto:80973986587@ukr.net)

**Bondar Yevhenii** – Lecturer of the Department of Armored Vehicles, e-mail: [eugeny.bondar@ukr.net](mailto:eugeny.bondar@ukr.net)

**Kashkanov Andrii** – Sc. Dr. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, e-mail: [a.kashkanov@vntu.edu.ua](mailto:a.kashkanov@vntu.edu.ua)