

# Загальні питання

УДК 629.3.027 (007.52)

DOI: 10.30748/nitps.2019.34.18

В.М. Клименко, В.Т. Беліков, О.П. Григор'єв, В.І. Осипенко

*Військова академія, Одеса*

## ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО РОЗРОБКИ ТРАНСПОРТНОЇ ПЛАТФОРМИ БОЙОВОГО РОБОТОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ З НЕЗАЛЕЖНИМ ПРИВОДОМ ЧОТИРЬОХ КОЛІС

*Пропонується варіант конструктивної компоновки ведучих коліс рушія для колісних і гусеничних автономних транспортних блоків-модулів військового наземного робота. За допомогою векторно-матричної форми складання диференціальних рівнянь руху механічної системи описується рух центру мас транспортної платформи бойового робототехнічного комплексу з незалежним приводом чотирьох коліс.*

**Ключові слова:** транспортна платформа, військовий наземний робот, електромеханічна трансмісія, автономні блоки-модулі, система рівнянь для неголономних зв'язків.

### Вступ

Незважаючи на те, що більшість наземних роботів, які перебувають у цей час на озброєнні, призначені для пошуку і виявлення фугасів, мін, саморобних вибухових пристроїв, а також їхнього розмінування, з кожним роком вони починають займати все більше помітне місце в бойових порядках передових армій, і, як відзначають військові експерти, вже до 2025 року бойовий робот буде здатний разом з бійцем-людиною, а найчастіше й замість нього, вирішувати велику кількість завдань на полі бою [1–2].

За умов “гібридної” війни з Росією Україні необхідно враховувати фактор модернізації ЗС РФ, отже станом на 2020 р. відповідну державну програму, яка передбачає пришвидшене надходження для потреб армії, авіації і флоту сучасних роботизованих комплексів, буде реалізовано на рівні 70%.

Таким чином, для України впровадження подібних типів озброєнь не є справою довільного вибору, а питанням національного виживання, захисту життєво важливого національного інтересу.

Вивченню керованого руху роботів різних класів сьогодні у всьому світі присвячена дуже велика кількість досліджень [3–5]. Серед них значну цікавість викликає клас колісних мобільних роботів [6] – одноколесні (моноцикли), двохколесні (велосипеди), n-колесні роботи з рульовим управлінням. Основні підходи до виводу рівнянь руху колісних роботів базуються на апараті неголономної механіки П. Аппеля, П.В. Воронця, С.А. Чаплигіна та інших авторів.

**Метою статті** є теоретичне обґрунтування функціонування найменш вивченого мобільного робота з конструктивною компоновкою ведучих коліс рушія у вигляді автономних транспортних блоків-

модулів. За допомогою вирішення системи нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку описується рух бойового робототехнічного комплексу, осі коліс якого жорстко зв'язані з його несучою платформою.

### Основна частина

Результати досліджень, які підтверджені досвідом серійного промислового виробництва і практичного бойового використання наземних військових роботів, роботизованих пристроїв та комплексів, які мають загальну масу в діапазоні 25...500 кг, в умовах реальних бойових дій показали, що єдиним реальним джерелом енергопостачання для таких нових зразків військової техніки є генератори електричної енергії електрохімічного та накопичувального типів у вигляді акумуляторів, паливних елементів і суперконденсаторів, відповідно [3–4; 6].

В свою чергу, це привело до необхідності застосування електромеханічних трансмісій прямого електричного приводу з широким використанням тягових електричних двигунів, вбудованих безпосередньо без проміжних механічних передач, у обіддя коліс наземного робота, які надають йому можливість рухатись. При цьому колеса, що приводяться до руху вказаним способом, можуть перебувати у безпосередньому механічному контакті з ґрунтом як у наземних роботів з колісними, так і з гусеничними рушіями.

Той факт, що саме це технічне рішення повністю відповідає самим сучасним тенденціям розвитку наземних транспортних систем, знаходить переконливе підтвердження в масовому переході, що відбувається зараз в сучасному автомобілебудуванні, до електромеханічних трансмісій з вбудованими електричними двигунами. Розробки останніх років в об-

ласті створення електричних двигунів, в яких основне магнітне поле створюється постійними магнітами високої енергії на базі рідкоземельних металів (самарій, неодим, диспрозій і тому подібні), дозволили не тільки значно підвищити питомі показники електродвигунів, але і буквально в рази збільшити їх переважувальну здатність. Завдяки застосуванню мотор-коліс з приводними електродвигунами оберненої конструкції, які вбудовані без редуктора безпосередньо в обід колеса, виявляється легко досяжною практична реалізація повнопривідних схем електромеханічних трансмісій, завдяки повністю автономному приводу кожного колеса. Це забезпечує якісно нові можливості систем приводу, які істотно підвищують експлуатаційні характеристики транспортних систем наземних мобільних роботів через комп'ютеризацію автоматичних систем управління ними.

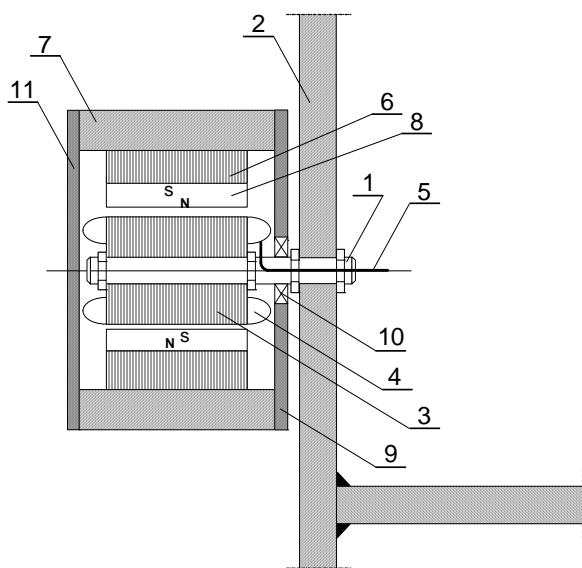


Рис. 1. Конструктивна схема мотор-коліса наземного робота на колісному ході

Загальний для приводного електродвигуна і приводного колеса нерухомий вал 1 жорстко прикріплений до борту 2 автономного транспортного функціонального блоку-модуля військового наземного робота. На валу 1 знаходиться статор 3 приводного двигуна, що несе якірну обмотку 4, яка одержує електричне живлення за допомогою електричних проводів 5. На роторі 6 приводного двигуна, запресованого в ободі 7 привідного колеса, жорстко закріплена система високоенергетичних постійних магнітів 8. До обода 7 прикріплені бічна кришка 9, що знаходиться на підшипнику котіння 10, та зовнішня захисна кришка 11.

Представлений на рис. 2 вінець 7, який приводить в хід ланцюг гусеничного рушія наземного військового робота, забезпечений зубцями 12, які вхо-

На основі використання концепції організації електромеханічного приводу за допомогою електричних двигунів слід рекомендувати застосування рушіїв у вигляді автономних колісних, гусеничних та комбінованих колісно-гусеничних функціональних блоків-модулів.

Завдяки такій конструкції рушія з'являється можливість комплектації одного і того ж корпусного конструктиву військового наземного робота набором різних рушіїв у вигляді автономних блоків-модулів, які вибирають відповідно до умов їх майбутнього бойового застосування. На рис. 1–2 показані приклади конструктивної компоновки ведучих коліс рушія для колісних і гусеничних автономних транспортних блоків-модулів, відповідно.

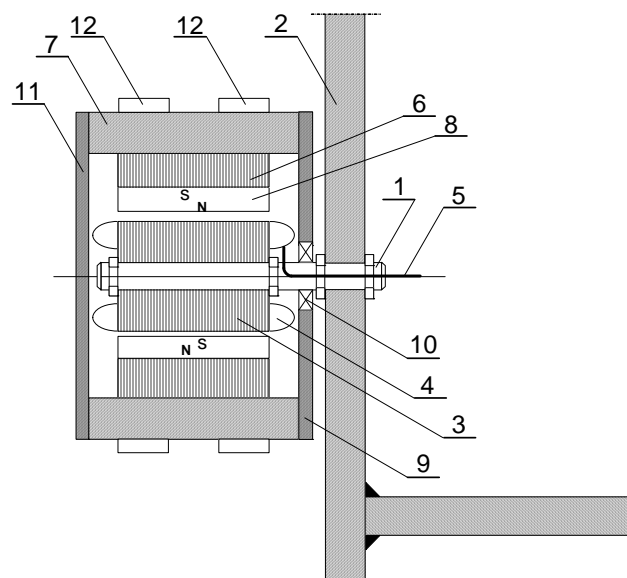


Рис. 2. Конструктивна схема мотор-коліса наземного робота на гусеничному ході

дять в зачеплення з траками або гнучкою безперервною стрічкою гусеничного рушія.

Для наших цілей дуже зручною є векторно-матрична форма складення диференціальних рівнянь руху механічної системи [7].

Виберемо нерухому систему координат  $Oxy$  так, щоб площина  $Oxy$  співпадала з горизонтальною площиною, по якій рухається робот (рис. 3). Рухомою платформою з чотирма ведучими колесами є системою п'яти твердих тіл з чотирма неголономними зв'язками. Для складення рівнянь руху такої системи скористуємось векторно-матричною формою рівнянь Лагранжа з невизначеними множниками.

Нехай положення мобільного робота визначається  $s$ -мірним вектором узагальнених координат  $q = [q_1, q_2, \dots, q_s]'$ . За умови відсутності проковзу-

вання  $k$  коліс ( $k=4$ ) на опорній шорсткій поверхні, складемо рівняння для  $k$  диференціальних неголомних зв'язків

$$\sum_{j=1}^s b_{ij} \dot{q}_j = 0, \quad (i = \overline{1, k}), \quad (1)$$

або в матричній формі

$$B \dot{q} = 0, \quad (1')$$

де  $B - (k \times s)$  прямокутна матриця, елементи якої є функціями узагальнених координат;

$\dot{q}$  – вектор узагальнених швидкостей.

Для складання рівнянь руху колісного робота скористуємося системою  $s$  рівнянь Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \left( \frac{\partial T}{\partial q} \right) = Q + B' \lambda, \quad (2)$$

де  $T = 0,5 \dot{q}' A \dot{q}$  – кінетична енергія рухомої системи – однорідна квадратична форма;  $A = A(q)$  – додатньо визначена симетрична матриця коефіцієнтів інерції;  $Q - s$  – мірний вектор узагальнених сил;  $\lambda - k$  – мірний вектор невизначених множників Лагранжа. Вирази (1') та (2) створюють систему  $s + k$  рівнянь для знаходження координат векторів  $q$  та  $\lambda$  як функцій часу.

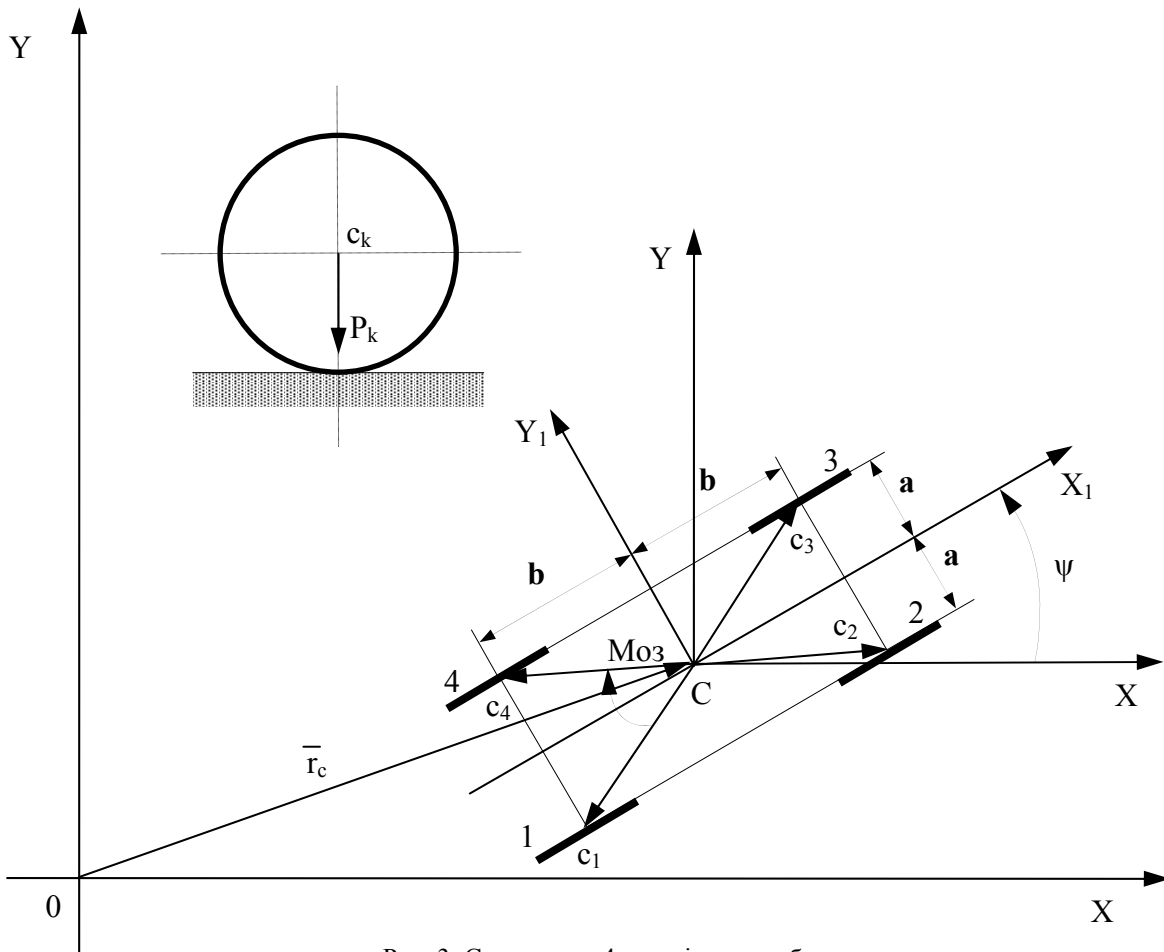


Рис. 3. Схема руху 4-х колісного робота

Враховуючи, що мобільний робот має чотири ведучих колеса, вектор узагальнених координат приймемо у такому вигляді

$$q = [x, y, \psi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4]', \quad (3)$$

де  $x, y$  – координати центру мас  $C$  робота в нерухомій системі координат  $Oxyz$ ;

$\psi$  – кут, створений осями  $Ox$  та  $Ox_1$  (поворот робота навколо осі  $Oz$ );

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – кути незалежних поворотів відповідних коліс відносно своїх вісей.

Для того, щоб врахувати залежність зміни кута повороту робота  $\psi = \psi(t)$ , виразимо орти  $i, j$  нерухомої системи координат, через орти  $i_1, j_1$  рухомої системи координат

$$\begin{aligned} i &= i_1 \cos \psi - j_1 \sin \psi, \\ j &= i_1 \sin \psi + j_1 \cos \psi. \end{aligned} \quad (*)$$

В нерухомій системі координат  $Oxyz$  розкладемо вектори  $\overline{CC_k}$  в системі координат  $Oxy$  (рис. 4) та замінимо орти  $i, j$  із (\*):

$$\begin{aligned}\overline{CC}_1 &= -ib - ja = -i_1(b \cos \psi + a \sin \psi) + j_1(b \sin \psi - a \cos \psi), \\ \overline{CC}_2 &= ib - ja = i_1(b \cos \psi - a \sin \psi) - j_1(b \sin \psi + a \cos \psi), \\ \overline{CC}_3 &= ib + ja = i_1(b \cos \psi + a \sin \psi) + j_1(-b \sin \psi + a \cos \psi), \\ \overline{CC}_4 &= -ib + ja = i_1(-b \cos \psi + a \sin \psi) + j_1(b \sin \psi + a \cos \psi).\end{aligned} \quad (**)$$

Складемо формули для знаходження векторів швидкостей точок контакту коліс з нерухомою шорсткою поверхнею:

$$V_{P_k} = V_A + [\Omega_5, \overline{CC}_k] + [\Omega_k, \overline{C}_k \overline{P}_k] = 0, \quad (4)$$

де  $\Omega_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$  – кутова швидкість повороту платформи;

ми;  $\Omega_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\phi}_k \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$  – кутова швидкість  $k$ -го колеса;

$k = \overline{1,4}$ .

Рух коліс без проковзування можливий лише в напрямку осі  $C_x$ , тоді як при повороті робота в напрямку осі  $C_y$  можливим є тільки зсув. Спроектуємо векторні рівняння (4) на вісь  $Cx_1$  та отримаємо систему чотирьох незалежних рівнянь для неголономних зв'язків:

$$\begin{aligned}\dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi - (b \sin \psi - a \cos \psi) \dot{\psi} - r \dot{\phi}_1 &= 0, \\ \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi + (b \sin \psi + a \cos \psi) \dot{\psi} - r \dot{\phi}_2 &= 0, \\ \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi + (b \sin \psi - a \cos \psi) \dot{\psi} - r \dot{\phi}_3 &= 0, \\ \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi - (b \sin \psi + a \cos \psi) \dot{\psi} - r \dot{\phi}_4 &= 0.\end{aligned} \quad (5)$$

З лівих частин рівностей (5) складемо чотирьохмірний вектор  $S$ , по якому побудуємо матрицю  $B$  з (1') у такий спосіб:

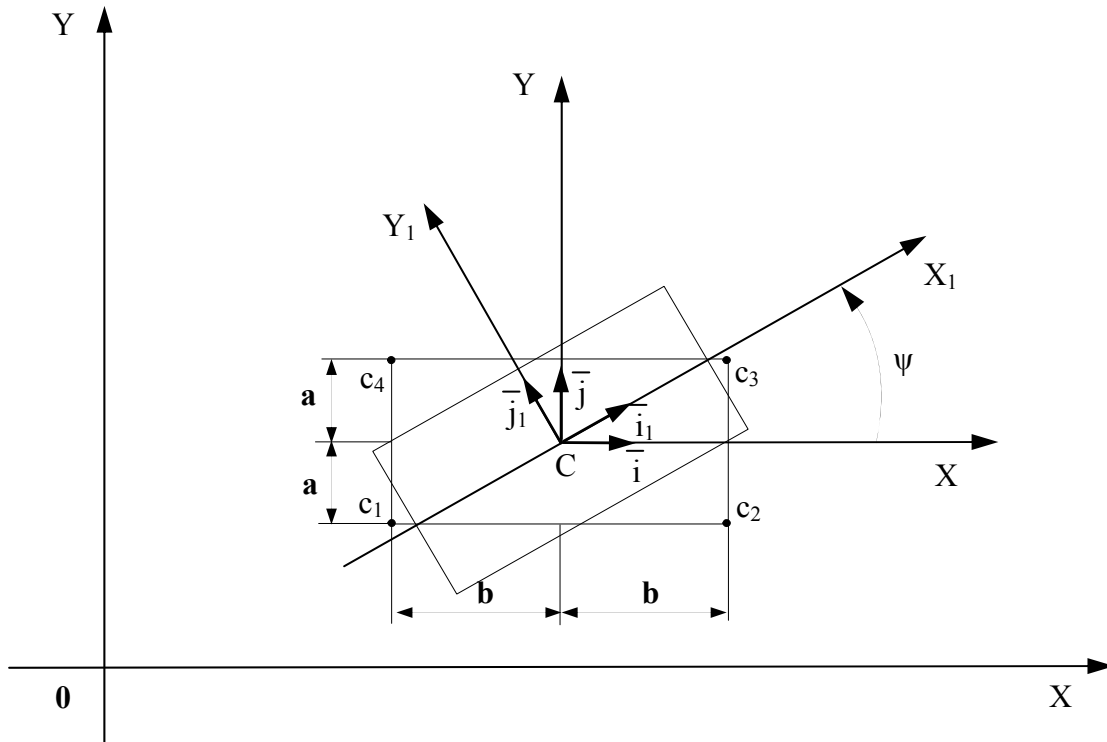


Рис. 4. До визначення векторів  $\overline{CC}_k$

$$B = \frac{\partial S}{\partial \dot{q}} = \begin{bmatrix} \cos \psi + \sin \psi & -b \sin \psi + a \cos \psi & -r & 0 & 0 & 0 \\ \cos \psi + \sin \psi & b \sin \psi + a \cos \psi & 0 & -r & 0 & 0 \\ \cos \psi + \sin \psi & b \sin \psi - a \cos \psi & 0 & 0 & -r & 0 \\ \cos \psi + \sin \psi & -b \sin \psi - a \cos \psi & 0 & 0 & 0 & -r \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Визначимо кінетичну енергію всієї системи. Позначимо через  $m_k$  – масу тіл, які складають систему; для подальшого прийемо, що маса усіх коліс однакова, тобто  $m_k = m$ ,  $\forall k = \overline{1,4}$ ; маса платформи

$m_5 = \tilde{M}$ ; моменти інерції коліс  $I_x = I_z \equiv I_1$ ,  $I_y = I_2$ , момент інерції платформи  $I_{z5} = I_5$ . Кінетичну енергію мобільного робота знаходимо у вигляді:

$$T = \sum_{k=1}^5 (m_k V'_{Ck} V_{Ck} + \Omega'_k I_k \Omega_k) / 2, \quad (7)$$

де  $V_{Ck}, \Omega_k$  – відповідно вектори лінійних швидкостей центрів мас та кутових швидкостей тіл системи у відносному русі навколо їх центрів мас. У відповідності з (7), маємо:

$$\begin{aligned}
 T_{C1} &= m((\dot{x} + a\dot{\psi})^2 + (\dot{y} - b\dot{\psi})^2) / 2, & T &= (4m + \tilde{M})(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) / 2 + I_{np}\dot{\psi} / 2 + \\
 T_{C2} &= m((\dot{x} + a\dot{\psi})^2 + (\dot{y} + b\dot{\psi})^2) / 2, & &+ I_2(\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 + \dot{\phi}_3^2 + \dot{\phi}_4^2) / 2, \\
 T_{C3} &= m((\dot{x} - a\dot{\psi})^2 + (\dot{y} + b\dot{\psi})^2) / 2, & (7') & \text{де } I_{np} \equiv I_5 + 4I_1 + 4m(b^2 + a^2). \\
 T_{C4} &= m((\dot{x} - a\dot{\psi})^2 + (\dot{y} - b\dot{\psi})^2) / 2, & & \text{Для знаходження вектора узагальнених сил} \\
 T_{C5} &= \tilde{M}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) / 2. & & Q = [Q_x Q_y Q_\psi Q_{\phi_1} Q_{\phi_2} Q_{\phi_3} Q_{\phi_4}]'. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Кінетична енергія платформи 5 мобільного робота у відносному русі навколо центра мас системи  $T'_{C5} = I_5\dot{\psi}^2 / 2$ , кінетична енергія  $k$ -го колеса у відносному русі навколо його центра мас:

$$T'_{Ck} = \Omega'_k I \Omega_k, \quad (7'')$$

де

$$\Omega_k = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix}, \quad (\forall k = \bar{1}, \bar{4}).$$

Скористуємося формулами (7–7'') та після приведення подібних подамо вираз кінетичної енергії мобільного робота:

Знайдемо суму потужностей усіх зовнішніх сил та моментів на можливих швидкостях системи:

$$\begin{aligned}
 -M_{oz}\dot{\psi} + M_1(t)\dot{\phi}_1 + M_2(t)\dot{\phi}_2 + M_3(t)\dot{\phi}_3 + M_4(t)\dot{\phi}_4 = \\
 = Q_x\dot{x} + Q_y\dot{y} + Q_\psi\dot{\psi} + Q_{\phi_1}\dot{\phi}_1 + Q_{\phi_2}\dot{\phi}_2 + Q_{\phi_3}\dot{\phi}_3 + Q_{\phi_4}\dot{\phi}_4. \quad (9')
 \end{aligned}$$

Порівнюючи значення коефіцієнтів при однакових компонентах вектора узагальнених швидкостей  $\dot{q}$  в обох частинах рівності (9'), знайдемо вектор узагальнених сил:

$$Q = [0 \quad 0 \quad -M_{oz} \quad M_1(t) \quad M_2(t) \quad M_3(t) \quad M_4(t)], \quad (10)$$

де  $M_{oz}$  – момент опору зсуву.

Тепер запишемо систему рівнянь руху колісного мобільного робота у формі Лагранжа з невизначеними множниками (2):

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} (4m + \tilde{M})\dot{x} \\ (4m + \tilde{M})\dot{y} \\ I_{np}\dot{\psi} \\ I_2\dot{\phi}_1 \\ I_2\dot{\phi}_2 \\ I_2\dot{\phi}_3 \\ I_2\dot{\phi}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -M_{oz} \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\psi & \cos\psi & \cos\psi & \cos\psi \\ \sin\psi & \sin\psi & \sin\psi & \sin\psi \\ -b\sin\psi + a\cos\psi & b\sin\psi + a\cos\psi & b\sin\psi - a\cos\psi & -b\sin\psi - a\cos\psi \\ -r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r \end{pmatrix} \times (\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4)' \quad (11)$$

або

$$\begin{aligned}
 (4m + \tilde{M})\ddot{x} &= \left(\sum_{k=1}^4 \lambda_k\right) \cos\psi, \\
 (4m + \tilde{M})\ddot{y} &= \left(\sum_{k=1}^4 \lambda_k\right) \sin\psi, \\
 I_{np}\ddot{\psi} &= -M_{oz} + (-\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_4)b \sin\psi + (\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4)a \cos\psi, \\
 I_2\ddot{\phi}_1 &= M_1(t) - r\lambda_1, \\
 I_2\ddot{\phi}_2 &= M_2(t) - r\lambda_2, \\
 I_2\ddot{\phi}_3 &= M_3(t) - r\lambda_3, \\
 I_2\ddot{\phi}_4 &= M_4(t) - r\lambda_4.
 \end{aligned} \quad (12)$$

Система диференціальних рівнянь руху чотириколісного робота (12) в сукупності з чотирма рівняннями неголономних зв'язків створюють замкнену систему диференціальних рівнянь для знаходження семи компонент вектора узагальнених координат  $q$  у формі (3) і чотирьох реакцій зв'язків  $\lambda_k$ . Нас цікавить знаходження диференціальних рівнянь плоского руху чотириколісного мобільного робота в залежності від зовнішніх моментів  $M_k(t)$ , де  $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ . Для цього, із останніх чоти-

рьох рівнянь системи (12) за допомогою неголономних зв'язків (5) видалимо відповідні кутові швидкості і одержимо рівняння реакцій зв'язків:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= \frac{M_1}{r} - \frac{I_2}{r^2} \frac{d}{dt} (\dot{x} \cos\psi + \dot{y} \sin\psi + (-b \sin\psi + a \cos\psi) \dot{\psi}), \\
 \lambda_2 &= \frac{M_2}{r} - \frac{I_2}{r^2} \frac{d}{dt} (\dot{x} \cos\psi + \dot{y} \sin\psi + (b \sin\psi + a \cos\psi) \dot{\psi}), \\
 \lambda_3 &= \frac{M_3}{r} - \frac{I_2}{r^2} \frac{d}{dt} (\dot{x} \cos\psi + \dot{y} \sin\psi + (b \sin\psi - a \cos\psi) \dot{\psi}), \\
 \lambda_4 &= \frac{M_4}{r} - \frac{I_2}{r^2} \frac{d}{dt} (\dot{x} \cos\psi + \dot{y} \sin\psi - (b \sin\psi + a \cos\psi) \dot{\psi}).
 \end{aligned} \quad (13)$$

Пошукові рівняння плоского руху мобільного робота отримуємо з перших трьох рівнянь системи (12) після підстановки в них реакцій зв'язків з (13) та деяких тривіальних перетворень:

$$\begin{aligned} \left(4m + \tilde{M} + \frac{4I_2}{r^2} \cos^2 \psi\right) \ddot{x} + \left(\frac{2I_2}{r^2} \sin 2\psi\right) \ddot{y} &= \left(\frac{\sum_{k=1}^4 M_k}{r} + \frac{4I_2}{r^2} (\dot{x} \sin \psi - \dot{y} \cos \psi)\dot{\psi}\right) \cos \psi, \\ \left(\frac{2I_2}{r^2} \sin 2\psi\right) \ddot{x} + \left(4m + \tilde{M} + \frac{4I_2}{r^2} \sin^2 \psi\right) \ddot{y} &= \left(\frac{\sum_{k=1}^4 M_k}{r} + \frac{4I_2}{r^2} (\dot{x} \sin \psi - \dot{y} \cos \psi)\dot{\psi}\right) \sin \psi, \\ \frac{d}{dt} \left( \left( I_{np} + \frac{4I_2}{r^2} (b^2 \sin^2 \psi + a^2 \cos^2 \psi) \right) \dot{\psi} \right) &= -M_{oz} + \frac{-M_1 + M_2 + M_3 - M_4}{r} b \sin \psi + \frac{M_1 + M_2 - M_3 - M_4}{r} a \cos \psi. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким чином, плоский рух мобільного робота з чотирма ведучими колесами визначається системою трьох нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку (14).

Розглянемо граничний випадок, який впливає з нелінійної системи рівнянь (14). Для цього приймемо ряд таких спрощень:

1) нехай несуча платформа мобільного робота має квадратну форму, тобто  $a = b$ ;

2) рух робота починається із стану спокою, перед початком руху робот знаходився у точці 0;

3) момент опору зсуву пропорційний кутовій швидкості платформи ( $\dot{\psi}$ ), тобто  $|M_{oz}| = \alpha \dot{\psi}^2$ , де  $\alpha$  – експериментальна стала величина;

4) нехай усі обертальні моменти коліс рівні по величині та напрямку, тобто  $M_k = M = const$ .

В цьому випадку третє диференціальне рівняння системи (14) матиме вигляд:

$$\left( I_{np} + \frac{4I_2 b^2}{r^2} \right) \ddot{\psi} = -\alpha \dot{\psi}^2, \quad (15)$$

з початковими умовами:

$$\begin{aligned} \psi(0) &= \psi_0, \\ \dot{\psi}(0) &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Інтеграл (15) за умовами (16) дає  $\psi(t) = \psi_0 = const$ . Враховуючи це, з перших двох рівнянь (14) після деяких перетворень отримуємо рівняння:

$$\ddot{y} = \ddot{x} \operatorname{tg} \psi_0. \quad (15')$$

До (15') допишемо початкові умови для координат центру мас робота:

$$x(0) = \dot{x}(0) = 0, \quad y(0) = \dot{y}(0) = 0. \quad (16')$$

Інтегруючи (15') за умовами (16'), знайдемо рівняння траєкторії центру мас  $C$  робота:

$$y(t) = \operatorname{tg} \psi_0 x(t). \quad (17)$$

## Висновки

Таким чином, у випадку сталості обертальних моментів коліс мобільного робота по величині та напрямку, його центр мас рухається по прямолінійній траєкторії, що і відповідає фізичній суті цієї задачі.

Система нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку (14), що визначає плоский рух мобільного робота з чотирма ведучими колесами, є суттєвим кроком у розробці цього класу роботів. Наступним кроком має бути відбір серед усіх траєкторій плоского руху, які визначаються системою (14), множини тих траєкторій, які необхідні у практиці використання таких роботів.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вирішення завдань оптимізації алгоритмів маршрутизації для мережі рухомих роботизованих систем, зміни напрямків їхнього руху у відповідності до ситуації в процесі виконання бойового завдання, оптимізації планів переміщення змішаних груп наземних роботів у автономному і керованому режимах.

## Список літератури

1. Григор'єв О.П. Модель обґрунтування оперативного-тактичних вимог і тактико-технічних характеристик до наземних бойових робототехнічних комплексів / О.П. Григор'єв, О.І. Кравчук, В.К. Набок // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). – 2014. – Вип. 2. – С. 128-134.
2. Клименко В.М. Порівняльні оцінки реалізуємості альтернативних варіантів роботизації озброєння та військової техніки десантно-штурмових військ при гіпотезах, що перетинаються / В.М. Клименко, Б.О. Дем'янчук // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних сил. – 2018. – № 3(57). – С. 25-31. <https://doi.org/10.30748/zhups.2018.57.04>.

3. Кожухівський А.Д. Розробка емулятора для моделювання системи навігації і управління мобільним роботом / А.Д. Кожухівський, О.В. Горбенко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2016. – № 1.– С. 55-60.
4. Корнєєв Д.А. Розробка програмного забезпечення для управління колісним роботом з використанням нечіткої логіки / Д.А. Корнєєв, О.В. Шматко // Системи обробки інформації. – 2016. – № 4(141). – С. 45-49.
5. Дергачов К.Ю. Рациональное управление рухом мобільних транспортних роботів / К.Ю. Дергачов, Т.В. Литвиненко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – Вип. 3(27). – С. 53-54.
6. Буданов В.М. О движении колесных роботов / В.М. Буданов, Е.А. Девянин // Прикладная математика и механика. – 2003. – Т. 67. – Вып. 2.
7. Мартыненко Ю.Г. О матричной форме уравнений неголономной механики / Ю.Г. Мартыненко // Сборник научно-методических статей по теоретической механике. – М.: Издат-во МГУ, 2000. – Вып. 23.
8. Brockett R.W. Asymptotic Stability and Feedback Stabilization / R.W. Brockett // Differential Geometric Control Theory. – USA: Birkhuser Boston, Inc., 2008. – P. 181-191.
9. Hashim S. A new strategy in dynamic time-dependent motion planning for nonholonomic mobile robots / S. Hashim, Lu Tien-Fu // IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – 2009. – P. 1692-1697.
10. Chen D. Kinematics control of wheeled robot based on angular rate sensors / D. Chen, F. Bai, L. Wu // IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, September 21-24, Chengdu, China. – 2008. – P. 598-602.
11. Multi-solution Problem for Track-Terrain Interaction Dynamics and Lumped Soil Parameter Identification / S. Hutangkabodee, Y.H. Zweiri, L.D. Seneviratne, K. Altho // Vol. 25 of the series Springer Tracts in Advanced Robotics. – P. 517-528.
12. Zenkov D.V. The energy-momentum method for the stability of nongolonomic system / D.V. Zenkov, A.M. Bloch, J.E. Marsden // Dynam. Stability Systems, 1998.

## References

1. Grigor'ev, O.P., Kravchuk, O.I. and Nabok, V.K. (2014), "Model obgruntuvannya operatyvno-taktychnykh vymog i taktyko-tehnichnykh harakterystyk do nazemnykh boyovykh robototekhnichnykh kompleksiv" [The model of operational tactical tactics and tactical technical characteristics to ground-based combat robot systems], *Collection of Scientific Works of the Military Academy*, No. 2, Odessa, pp. 128-134.
2. Klimenko, V.M. and Dem'yanchuk, B.O. (2018), "Porivnyalni otsinki realizuemosti alternatyvnykh variantiv robotizatsiyi ozbroennya ta viyskovoyi tehniki desantno-shturmovykh viysk pri gipotezah, scho peretynayutsya" [Comparative assessments of the implementation of alternative variants of robotizing armament and military equipment of landing troops under cross-hypotheses], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 3(57), Kharkiv, pp. 25-31. <https://doi.org/10.30748/zhups.2018.57.04>.
3. Kozhuhivskiy, A.D. and Gorbenko, O.V. (2016), "Rozrobka emulyatora dlya modelyuvannya sistemy navigatsiyi i upravlinnya mobilnym robotom" [Development of an emulator for modeling a navigation system and managing a mobile robot], *Bulletin of the Cherkasy State Technological University*, No. 1, Cherkasy, pp. 55-60.
4. Korneev, D.A. and Shmatko, O.V. (2016), "Rozrobka programnogo zabezpechennya dlya upravlinnya kolisnim robotom z vykoristannyam nechitkoyi logiki" [Development of software for controlling a wheel robot using fuzzy logic], *Information Processing Systems*, No. 4 (141), Kharkiv, pp. 45-49.
5. Dergachov, K.Yu. and Litvinenko, T.V. (2013), "Ratsionalne upravlinnya ruhom mobilnih transportnykh robotiv" [Rational management of the movement of mobile transport robots], *Systems of Control, Navigation and Communication*, No. 3(27), pp. 53-54.
6. Budanov, V.M. and Devyanin, E.A. (2003), "O dvizhenii kolesnykh robotov" [About the movement of wheel robots], *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 67, No. 2.
7. Martynenko, Yu.G. (2000), "O matrichnoy forme uravneniy negolonomnoy mehaniki" [On the matrix form of the equations of non-holonomic mechanics], *Collection of scientific and methodical articles on theoretical mechanics*, No. 23, Publishing-house of Moscow State University, Moscow.
8. Brockett, R.W., Milman, R.S. and Sussman, H.J. (2008), Asymptotic Stability and Feedback Stabilization, *Differential Geometric Control Theory*, Birkhuser Boston, Inc., USA, pp. 181-191.
9. Hashim, S. and Tien-Fu, Lu (2009), A new strategy in dynamic time-dependent motion planning for nonholonomic mobile robots, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1692-1697.
10. Chen, D., Bai, F. and Wu, L. (2008), Kinematics control of wheeled robot based on angular rate sensors, *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, September 21-24, Chengdu, China, pp. 598-602.
11. Hutangkabodee, S., Zweiri, Y.H., Seneviratne, L.D. and Altho, K. (2006), Multi-solution Problem for Track-Terrain Interaction Dynamics and Lumped Soil Parameter Identification, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Vol. 25, pp. 517-528.
12. Zenkov, D.V., Bloch, A.M. and Marsden, J.E. (1998), *The energy-momentum method for the stability of nongolonomic systems*, *Dynam. Stability Systems*, 57 p.

Надійшла до редколегії 20.12.2018  
Схвалена до друку 17.01.2019

**Відомості про авторів:****Клименко Вадим Миколайович**

кандидат військових наук доцент  
начальник кафедри Військової академії (Одеса)  
Одеса, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-9144-2362>

**Беліков Віктор Трифонович**

кандидат технічних наук доцент  
старший науковий співробітник науково-дослідної  
лабораторії науково-дослідного відділу Наукового центру  
Військової академії (Одеса),  
Одеса, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-4759-497X>

**Григор'єв Олексій Петрович**

кандидат технічних наук старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник науково-дослідної  
лабораторії науково-дослідного відділу  
Наукового центру Військової академії (Одеса),  
Одеса, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3222-918X>

**Осипенко Валерій Іванович**

кандидат військових наук доцент  
доцент кафедри Військової академії (Одеса),  
Одеса, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-5944-0666>

**Information about the authors:****Vadym Klimenko**

Candidate of Military Sciences Associate Professor  
Head of the Department of Military Academy (Odesa),  
Odesa, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-9144-2362>

**Victor Belikov**

Candidate of Technical Sciences Associate Professor  
Senior Research Associate of Research Laboratory  
of the Research Department of the Scientific Center  
of Military Academy (Odesa),  
Odessa, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-4759-497X>

**Alexei Grigoriev**

Candidate of Technical Sciences Senior Research,  
Lead Researcher of Research Laboratory  
of the Research Department of the Scientific Center  
of Military Academy (Odesa),  
Odessa, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3222-918X>

**Valery Osipenko**

Candidate of Military Sciences Associate Professor  
Senior Lecturer of the Department  
of Military Academy (Odesa),  
Odessa, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-5944-0666>

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ БОЕВОГО  
РОБОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С НЕЗАВИСИМЫМ ПРИВОДОМ ЧЕТЫРЕХ КОЛЕС**

В.Н. Клименко, В.Т. Беликов, А.П. Григорьев, В.И. Осипенко

*Предлагается вариант конструктивной компоновки ведущих колес движителя для колесных и гусеничных автономных транспортных блоков-модулей военного наземного робота. С помощью векторно-матричной формы составления дифференциальных уравнений движения механической системы описывается движение центра масс транспортной платформы боевого робототехнического комплекса с независимым приводом четырех колес.*

**Ключевые слова:** транспортная платформа, военный наземный робот, электромеханическая трансмиссия, автономные блоки-модули, система уравнений для неголономных связей.

**PROPOSALS FOR THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT PLATFORM OF THE BATTLE  
ROBOTECNICAL COMPLEX WITH THE INDEPENDENT DRIVER OF THE FOURTH WHEELS**

V. Klimenko, V. Belikov, O. Grigoriev, V. Osipenko

*The variant of a constructive arrangement of driving wheels of a propeller for wheel and track autonomous transport blocks-modules of a military ground-based robot is offered. The vector-matrix form of the compilation of the differential equations of motion of a mechanical system describes the movement of the center of mass of the transport platform of a combat robotic complex with an independent drive of four wheels. Despite the fact that most of the ground robots that are at present on the arsenal are designed to find and detect bombs, mines, improvised explosive devices, as well as their demining, every year they begin to occupy an increasingly prominent place in the combat arsenal of advanced armies, and, as military experts point out, by the year 2025, a combat robot will be able, along with a human fighter, and more often than not, to solve a large number of tasks on the battlefield. Thanks to the use of motor-wheels with electric motors of the inverse design, which are built without gearbox directly into the wheel's rim, it is easy to achieve the practical implementation of all-wheel drive electromechanical transmissions, thanks to the fully autonomous drive of each wheel. It provides qualitatively new features of drive systems that significantly enhance the performance of the transport systems of land mobile robots through the automation of automatic control systems for them. On the basis of the use of the concept of the organization of an electromechanical drive with the help of electric motors it is recommended to use the propulsion engines in the form of stand-alone wheel, crawler and combined wheel-tracked functional blocks-modules. Thanks to this design, the propulsion engineer has the opportunity to complete the same building structure of the military ground work with a set of different engines in the form of autonomous blocks-modules, which are selected according to the conditions of their future combat application. The system of nonlinear differential equations of the second order, which determines the plane motion of a mobile robot with four driving wheels, is an essential step in the development of this class of robots. The next step should be to select among all the trajectories of flat motion, which are determined by the system, the set of trajectories that are required in the practice of the use of such robots.*

**Keywords:** transport platform, military ground robot, electromechanical transmission, autonomous blocks-modules, system of equations for non-holonomic connections.