

УДК 007.52

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771462023302678>А. С. Довгополий¹, д.т.н., професор, А. В. Загірський², магістр

МЕХАНІКА ТА КЕРОВАНІСТЬ БЕЗПЛОТНИХ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ В УМОВАХ СКЛАДНОГО РЕЛЬЄФУ

Ua Запропоновані основні кінематичні схеми колісних приводів наземних роботизованих комплексів високої прохідності. Отримані залежності геометричних та динамічних параметрів шасі від параметрів перешкод та умови їх подолання. Показані динамічні моделі колісних шасі для попереднього розрахунку при виборі основних елементів наземного роботизованого комплексу. Вперше проведена оцінка параметрів профілю пересіченої поверхні, характеру зчеплення коліс з поверхнею та моменту двигуна для подолання перешкоди та забезпечення керованості системи. Показано, що доступними формами профілю поверхні для руху шасі з відповідними колісними приводами можуть бути поверхні з виступами та впадинами, зі сторонніми предметами - завалами, похилі площини, сходи та сходові марші.

En The main kinematic schemes of the wheel drives of ground robotic complexes of high passability are proposed. The obtained dependences of the geometric and dynamic parameters of the chassis on the parameters of the obstacles and the conditions for overcoming them. Dynamic models of wheeled chassis are shown for preliminary calculation when choosing the main elements of the ground robotic complex. For the first time, the parameters of the cross-sectional surface profile, the nature of the wheels' adhesion to the surface, and the engine torque to overcome the obstacle and ensure the controllability of the system were evaluated. It is shown that available forms of the surface profile for the movement of the chassis with appropriate wheel drives can be surfaces with protrusions and depressions, with extraneous objects - rubble, inclined planes, steps and staircases.

Вступ

Загально відоме зростаюче застосування безпілотних наземних роботизованих комплексів у багатьох галузях [1 – 4]. Однією із головних проблем сучасних війн є збереження життя військових на лінії зіткнення, у тому числі шляхом уникнення безпосереднього вогневого контакту. Безпілотні наземні роботизовані комплекси (БНРК) призначені для вирішення цієї проблеми. У роботах [5, 6, 7] показані НРК із розширеними функціями та підвищеною прохідністю на пересіченій місцевості для транспортування

¹ ЦНДІОВТ

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

вантажів та встановлення засобів ураження. Для керування їх рухом використовуються автономні та дистанційно керовані системи. У той же час в існуючій літературі відсутні дослідження та рекомендації щодо визначення умов прохідності та керованості основних кінематичних схем колісних шасі НРК під час руху по пересіченій місцевості. Висока активність створення та широта застосування БНРК [8, 9, 10] визначають дослідження їх динамічних властивостей, розробку підходів та методів проектування актуальною проблемою.

Постановка задачі

Метою дослідження є визначення умов прохідності та керованості основних кінематичних схем колісних шасі безпілотних наземних роботизованих комплексів по пересіченій місцевості шляхом розробки динамічних моделей шасі, як об'єктів автоматичного керування, оцінка та порівняння можливостей різних кінематичних схем колісних шасі.

Кінематичні схеми колісних шасі для подолання перешкод

Узагальнення існуючих розробок [1 - 4, 8] та їх індукція дозволили вибрати для дослідження основну групу схем та моделей колісних шасі, що показані на рис. 1 - рис. 9.

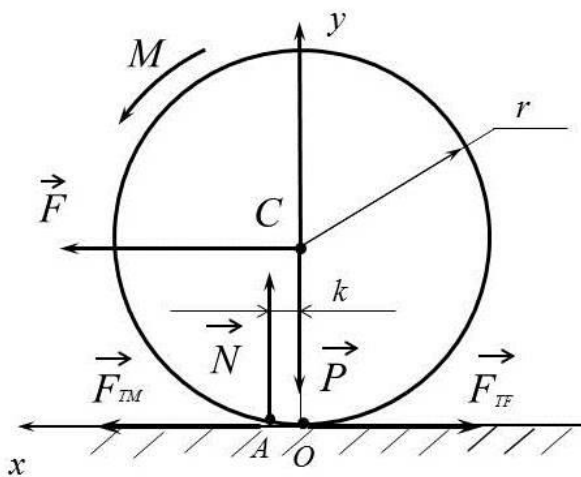


Рис. 1. Колесо на площині

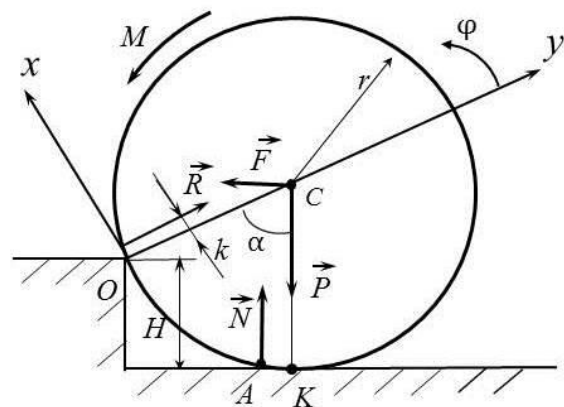


Рис. 2. Рух по перешкоді

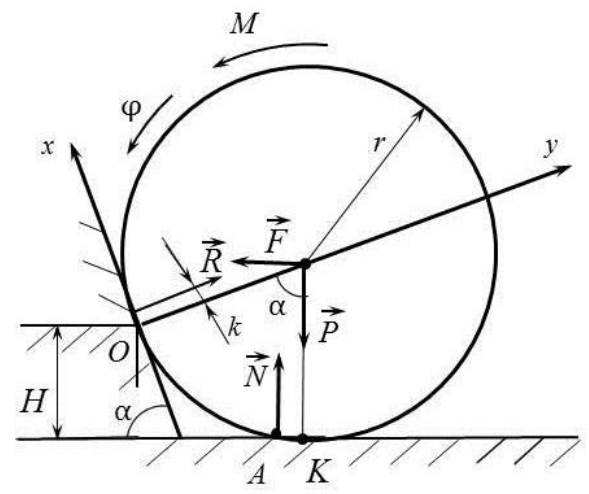


Рис. 3. Еквівалентна динамічна модель

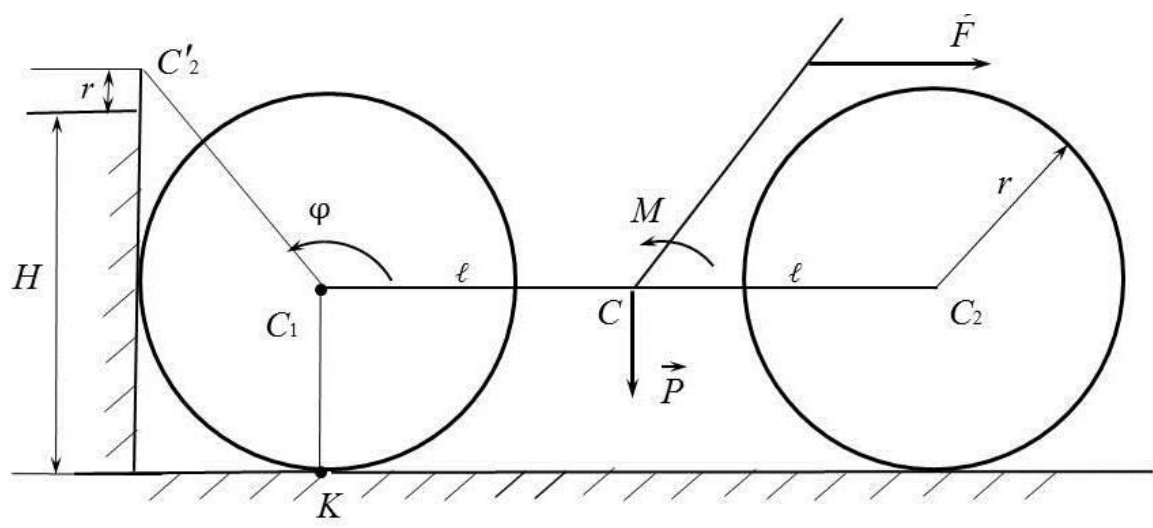


Рис. 4. Двоколісна траверса із обертанням

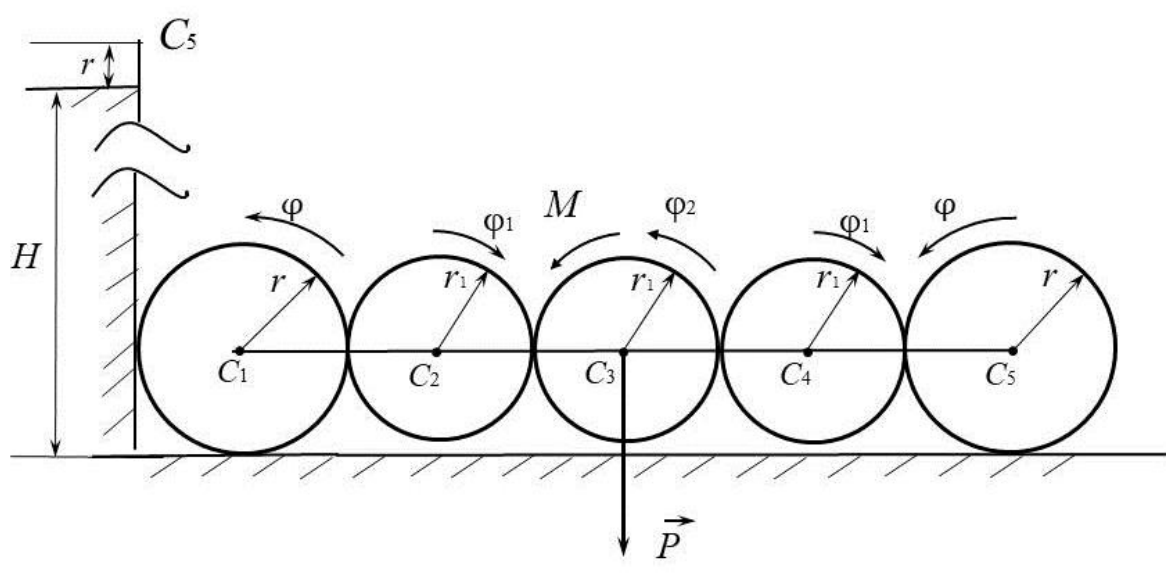


Рис. 5. Ланцюговий колісний привід

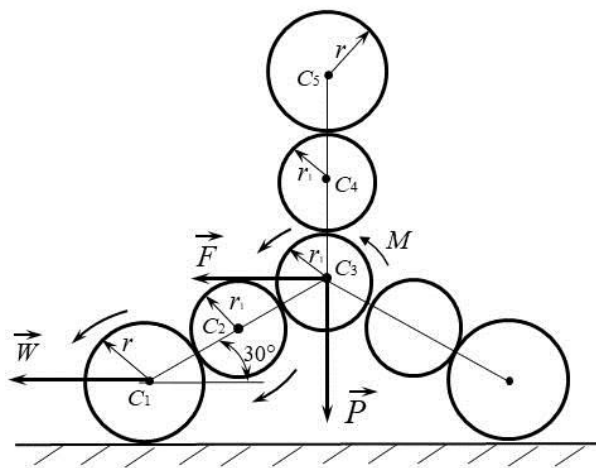


Рис. 6. Трипроменева траверса із обертанням

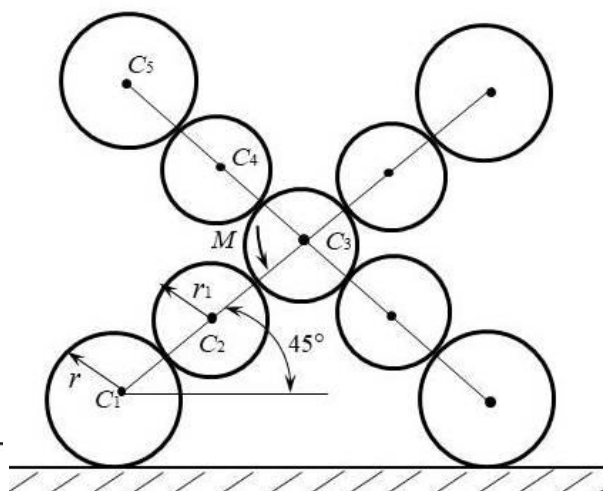


Рис. 7. Чотирипроменева траверса із обертанням

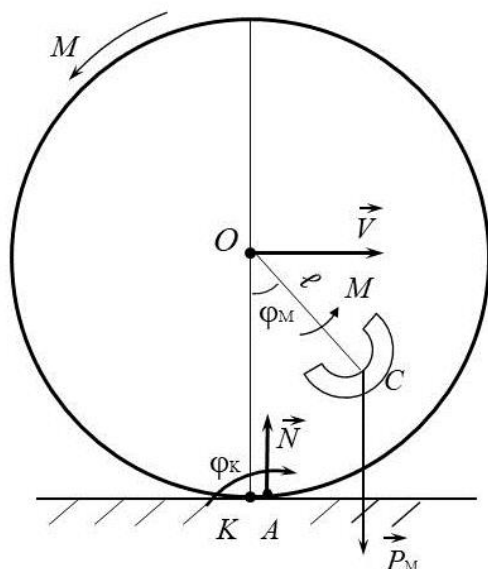


Рис. 8. Реакційне колесо

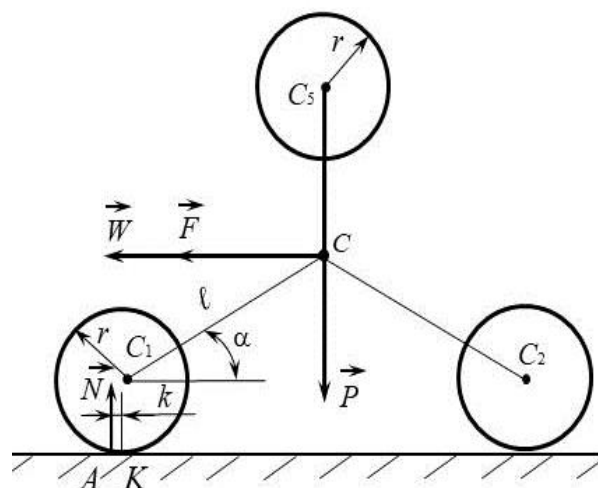


Рис. 9. Трипроменева колісна група

Колесо та механіка його кочення по поверхні з перешкодами

Ведуче колесо (колесо, до якого прикладений момент двигуна M)

Під час руху по горизонтальній неідеальній поверхні (рис. 1) у випадку ведучого колеса ($M, F = 0$) на нього діють момент двигуна M , сила ваги P частини шасі, що віднесена до цього колеса, нормальна реакція поверхні N , сила тертя ковзання F_{TM} , тертя кочення, що визначається коефіцієнтом k . Використовуючи диференціальні рівняння плоского руху [11], отримаємо умову кочення колеса без ковзання

$$M < Pk + (r + I_C / mr) f_c P, \quad (1)$$

$$m\ddot{x}_C = F_{TM}, \quad I_C\ddot{\varphi} = M - F_{TM}r - Nk, \quad (2)$$

де I_C – момент інерції колеса,

$P = mg$, $m = m_p + m_k$, m_k – маса частини шасі, що припадає на колесо, m_p – маса колеса, g – прискорення вільного падіння, f_c – коефіцієнт тертя ковзання спокою.

Рух по перешкоді (рис. 2) можна зобразити еквівалентною динамічною моделлю кочення по похилій площині (рис. 3) [11] та рівнянням

$$(I_C + mr^2) = M - P(r \sin(\alpha - \varphi) + k \cos(\alpha - \varphi)) \quad (3)$$

за умови кочення без ковзання

$$M < Pk \sin \alpha + \left(r + \frac{I}{mr} \right) f_c P \cos \alpha - \frac{I}{r} g \sin \alpha, \quad (4)$$

в яких зв'язок перешкоди із похилою площиною за $H < r$ ($\alpha < 90^\circ$) визначається співвідношенням $\cos \alpha = (r - H) / r$. Із (4) та рис. 2, рис. 3 слідує, що висота перешкоди повинна бути $H < r$ для можливості її подолання колесом. Згідно рівняння (3) отримаємо умову подолання перешкоди

$$M > P \left[r \cdot \sin(\alpha - \varphi) + k \cdot \cos(\alpha - \varphi) \right]_{max}. \quad (5)$$

Для випадку $r \gg k$ отримаємо $M_{max} > P \cdot r \cdot \sin \alpha$.

Якщо $\alpha = 90^\circ$ ($H = r$) $\cdot R = 0$, і можливе ковзання колеса в прямому куті двох площин. Для можливості руху колеса по вертикальній площині вгору необхідно формування у точці O нерозривного з'єднання шарнірного типу, або зубчатого.

Ведене колесо (колесо, до якого прикладена сила тяги F).

У цьому випадку ($M = 0$, F) сила тяги визначається як

$$F = (r^2 \cos \alpha)^{-1} (I_C + mr^2) \cdot W + (k/r + \operatorname{tg} \alpha) \cdot P. \quad (6)$$

Із (6) видно, що за $\alpha = 90^\circ$ ($H = r$) рух веденого колеса неможливий (колесо перестає бути керованим). Перешкода висотою $H = r$, яка є граничною для ведучого колеса, є неможливою для подолання веденим колесом.

Двоколісна траверса з обертанням (рис. 4)

Під дією моменту M двигуна траверса C_1C_2 обертається навколо осі, що проходить через т. C_1 , незалежно від наявності перешкоди. Її кінематика дозволяє долати перешкоди максимальною висотою $H_{max} = \sqrt{(4l^2 - r^2)}$, $l > r$ у разі достатнього моменту M двигуна приводу та

необхідних умовах контакту коліс без ковзання. Значення моменту знайдемо з рівняння обертального руху траверси на кут φ (рис. 4)

$$I_{C_1}\ddot{\varphi} = M - Pl \cos \varphi - Fl \sin \varphi,$$

$$I_{C_1} = I_C + 4m_K l^2 + I_l, \quad P = mg = (m_K + m_P)g; \quad (7)$$

$$M > (P + F \cdot l \cdot \sin \varphi), \quad M_{max} = M(\varphi = 0) = P \cdot l. \quad (8)$$

Із рис. 4 знайдемо максимальне вертикальне переміщення центра мас системи під час руху із перешкодою: $\Delta h_C = C_1 C_2 = l$ ($C_1 C_2$ – довжина траверси). Динамічна модель (7) відповідає кутам $\varphi < 90^\circ$. У разі зростання кута φ колесо C_1 почне рухатись у протилежному напрямку. Точне значення кута φ залежить від характеристик зчеплення поверхонь колеса та площини у точці контакту. Для уповільнення зворотного руху необхідно знімати прикладений момент M у разі досягнення значення $\varphi = 90^\circ$.

Двопроменева траверса з обертанням (рис. 5)

Момент M двигуна прикладений до центрального колеса C_3 , яке разом із усіма колесам закріплене шарнірно на траверсі $C_1 C_5$. Під дією моменту M колеса C_1 та C_5 будуть рухатись по поверхні, та у випадку відсутності перешкод динаміка їх руху аналогічна рис. 1. У разі стикування із перешкодою колесо C_1 стає нерухомим, а траверса $C_1 C_5$ буде здійснювати обертання навколо осі C_1 аналогічно двоколісній траверсі з обертанням

(рис. 4) відповідно рівнянню (7), у якому $I_{C_1} = I_{C_1 C_5} + \sum_{i=2}^5 I_{K_i} + m_{K_i} \cdot (C_1 C_i)^2$ –

момент інерції системи відносно осі C_1 , m_{K_i} , I_{K_i} – маса та момент інерції i – го колеса, $I_{C_1 C_5}$ – момент інерції траверси $C_1 C_5$, m_P – частка маси платформи, що відповідає колісному приводу, F – сила протидії ведених коліс,

$P = \left(\sum_{i=2}^5 m_{K_i} + m_P \right) g$. Для руху приводу необхідно, щоб виконувалась умова

$$M > (P \cos \varphi + F \sin \varphi) C_1 C_3, \quad C_1 C_3 = r + 3r_1 \quad (9)$$

при максимальному значенні

$$M_{max} = P \cdot C_1 C_3 = P \cdot (r + 3r_1). \quad (10)$$

Подолання перешкоди максимальної висоти забезпечується у разі відсутності проковзування контактуючого колеса із поверхнею. Максимальне вертикальне переміщення центра мас C_3 системи при русі по перешкоді буде (рис. 5) $\Delta h_C = C_1 C_3 = r + 3r_1$.

Трипроменева траверса з обертанням (рис. 6) кінематично та за динамічними властивостями подібна до двопроменевої (рис. 5). Із рис. 6 максимальне вертикальне переміщення центра мас C_3

$$\Delta h_c = 0,5 \cdot \sqrt{3} \cdot (r + 3r_1).$$

Чотирипроменева траверса з обертанням (рис. 7) є модифікацією трипроменевої (рис. 6). Це зводить її динамічну модель до рівнянь (7), (9), (10). Значення максимального переміщення центра мас C_3 буде

$$\Delta h_c = 0,3 \cdot (r + 3r_1).$$

Реакційне колесо (рис. 8) рухається під дією реактивного моменту незрівноваженого ротора – маятника OC . Використовуючи закони динаміки [11], отримаємо для усталеного режиму руху кут φ_M відхилення маятника із умови $m_M \cdot g \cdot l \sin \varphi_M = M$ та кутову швидкість $\dot{\varphi}_K$ обертання колеса:

$$\dot{\varphi}_K = (M - M_T) / f_K, \quad P_M = m_M g,$$

m_M – маса маятника, $l = OC$ – відстань до його центра мас C , f_K – коефіцієнт в'язкого тертя в опорах обертання ротора, M – момент двигуна, M_T – момент тертя кочення колеса, φ_M , φ_K – абсолютні кути поворотів маятника та колеса.

Ведена трипроменева колісна група (рис.9) являє собою симетричну колісну групу з трипроменевою траверсою. Максимальна висота перешкоди, яку може здолати ця колісна група, визначається виразом

$$H_{max} = \sqrt{3l^2 - r^2}.$$

Кінематичні схеми наведених колісних приводів (рис. 3 - рис. 7, рис. 9) можуть використовуватись у шасі безпілотних наземних транспортних засобів як ведучих так і ведених коліс.

Керування розворотом наземного безпілотного транспортного засобу. Суттєве спрощення системи керування шасі порівняно із традиційними [1, 4] дає застосування в приводі електричного мотора – колеса [12].

Розглянемо формування моменту для розвороту шасі за сигналами системи керування. Виконавчими пристроями (органами) є мотори – колеса (рис. 10), які формують моменти M , прикладені до коліс шасі. При цьому зі сторони поверхні, на якій встановлене шасі, на колеса будуть діяти сили тертя ковзання спокою $F_{T1} = f_c N$. Вони утворюють пари сил $(F_{T1}, -F_{T1})$ із моментами $M_1(F_{T1}, -F_{T1})$. Останні зумовляють розворот шасі на площині та виникнення пар сил тертя ковзання:

$$(F_{T2}, -F_{T2}), \quad F_{T2} = f_p N$$

із моментами $M_2(F_{T2}, -F_{T2})$.

Відповідно до загальних теорем динаміки, отримуємо диференціальне рівняння розвороту шасі

$$\begin{aligned} I_C \dot{\omega} &= 2M_1(F_{T1}, -F_{T1}) - 2M_2(F_{T2}, -F_{N2}), \\ M_1(F_{T1}, -F_{T1}) &= aF_{T1}, \\ M_2(F_{T2}, -F_{T2}) &= bF_{T2}, \\ F_{T1} &= f_C N, \quad F_{T2} = f_P N, \quad f_C > f_P, \end{aligned} \quad (11)$$

в яких позначено N – нормальна реакція площини, I_C – момент інерції шасі відносно центральної осі, f_C , f_P – коефіцієнти тертя ковзання спокою та руху. Рівняння (11) дозволяє досліджувати особливості динаміки розвороту платформи шасі при різних можливих варіантах формування моментів двигуна M системою керування, та, відповідно моментів M_1 та M_2 .

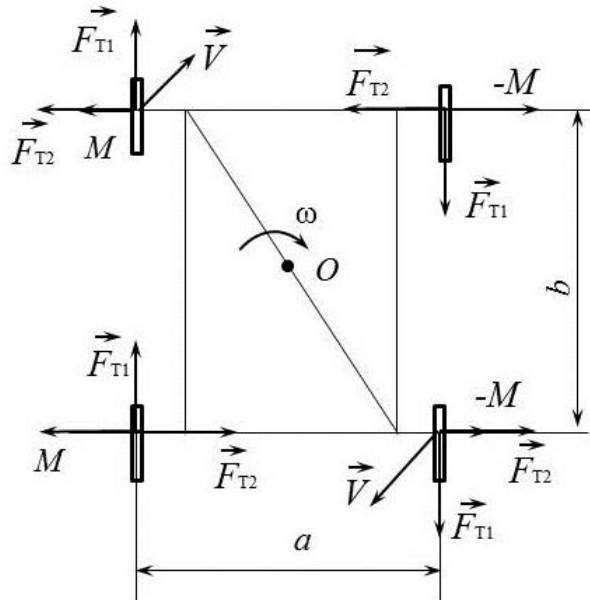


Рис. 10. Колісне шасі

Оцінка швидкості руху колісного шасі та потужності двигуна
Нехтуючи в'язким тертям при русі, проведемо розрахунок швидкості руху, використовуючи динамічні рівняння руху центра мас, та знайдені вище вирази для моментів двигуна. Прикладений до колеса момент M двигуна, кутова швидкість ω_k обертання колеса та потужність Q двигуна, що віднесена до одного колеса, зв'язані співвідношенням [11]

$$Q = M\omega_k = Mr^{-1}V_C, \quad V_C = r\omega_k, \quad (12)$$

в якому V_C , r – швидкість центра мас колеса та його радіус. Вираз (12) дозволяє розрахувати один із необхідних параметрів у разі решти заданих.

Розрахунок потужності двигуна повинен враховувати максимальне значення необхідного моменту торкання при початку руху зі стану спокою.

Розрахунок необхідного моменту двигуна для керуваності шасі проведемо для розглянутих вище основних кінематичних схем.

1. Шасі з одноколісним приводом (рис. 11).

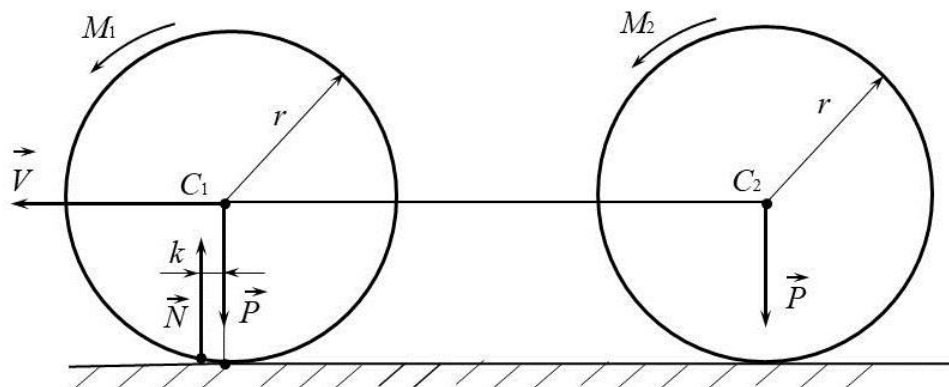


Рис. 11. Одноколісний привід

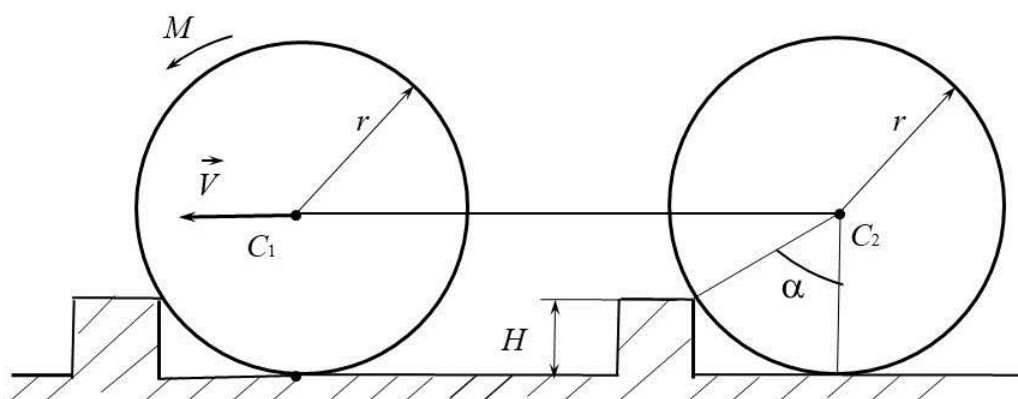


Рис. 12. Рух із перешкодою

1.1. Рух по горизонтальній площині:

а) виходячи із рівнянь (1), (3) [11] у разі ведучого переднього колеса ($M_1 = M$, $M_2 = 0$), отримуємо умову відсутності ковзання $2k < (r + I_C / mr) f_C + k(1 - I_C / mr^2)$, звідки

$$k < r \cdot f_C, \text{ якщо } M > 2 \cdot k \cdot P. \quad (13)$$

Тут і далі позначено: $I_C = m_K \rho_K^2$, $m = m_K + m_P$, $P = mg$, I_C – момент інерції відносно центральної осі колеса масою m_K та радіусом r і радіусом інерції ρ_K , M – момент двигуна.

б) при обох ведучих колесах ($M_1 = M_2 = M$) умовою руху є

$$k < r f_C, \quad M > kP. \quad (14)$$

1.2. Рух по горизонтальній площині з перешкодою (рис. 12):

а) ведуче переднє колесо. Виходячи із (1), (3), отримуємо, що шасі долає перешкоди висотою $H < r$ у разі виконання умов

$$r \cdot \sin \alpha + k \cdot \cos \alpha < f_c r \cdot \cos \alpha + \quad (15)$$

$$+ (f_c r \cdot \cos \alpha - k \cdot \cos \alpha - r \cdot \sin \alpha) \cdot I_c / mr^2 - \rho_k^2 \sin \alpha / r,$$

$$M > 2(r \cdot \sin \alpha + k \cdot \cos \alpha)P.$$

б) ведучі обидва колеса (рис. 13). У цьому випадку перше колесо зможе здійснювати рух вгору по вертикальній перешкоді висотою $H > r$ якщо

$$M_2 > (r / f_c) \cdot P_1 + (k_2 + r \cdot f_c) \cdot P_2, \quad (16)$$

$$M_1 > (r + k / f_c) P_1. \quad (17)$$

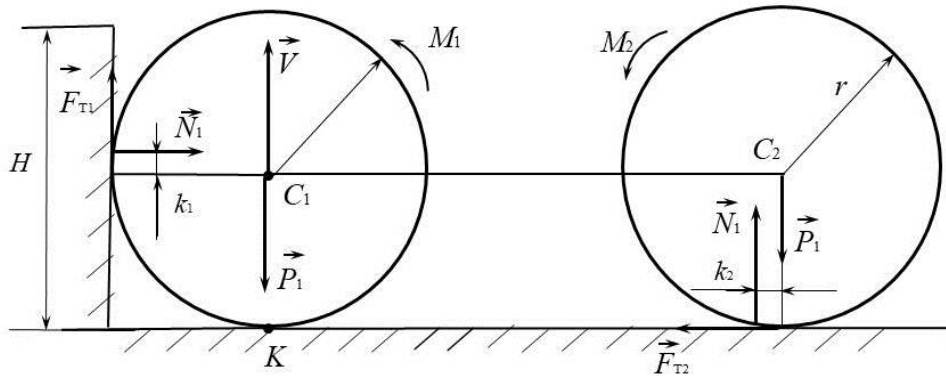


Рис. 13. Одноколісний привід

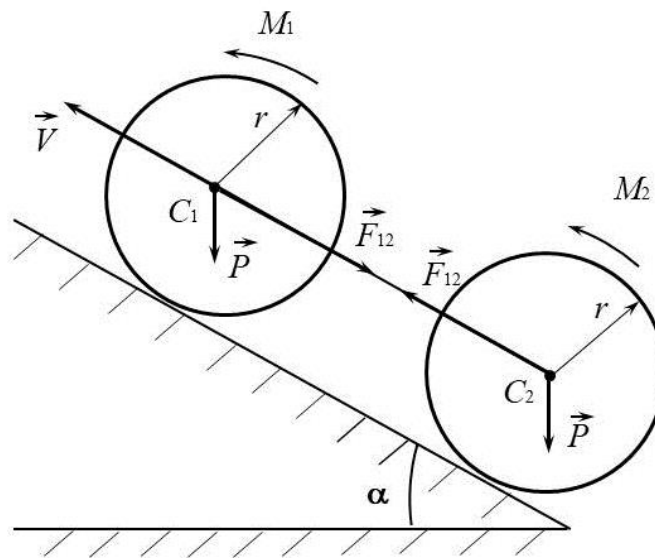


Рис. 14. Рух по похилій площині з перешкодою

Але умова (16) не може бути виконана під час фрикційного контакту поверхонь, так як не може бути виконана наступна умова не ковзання другого колеса $r / f_c + k_c < I_c / m \cdot r \cdot (f_c - 1 / f_c)$ для існуючих значень коефі-

цієнта тертя ковзання f_c поверхонь [13]. Для її виконання потрібно забезпечувати нефрикційний (жорсткий) контакт поверхонь.

1.3. Рух по похилій площині (рис.14):

а) якщо ведуче лише переднє колесо ($M_1 = M$, $M_2 = 0$) відсутність його проковзування буде при

$$2\operatorname{tg}\alpha < f_c + k/r, \quad (18)$$

а для руху потрібно забезпечити момент двигуна

$$M > 2 \cdot (r \cdot \sin\alpha + k \cdot \cos\alpha) \cdot P. \quad (19)$$

б) у разі обох ведучих колеса умовами руху без ковзання є

$$\operatorname{tg}\alpha < f_c + k/r, \quad M > (r \cdot \sin\alpha + k \cdot \cos\alpha)P. \quad (20)$$

в) вихід шасі із похилої площини (рис. 15). У випадку обох ведучих коліс повинні виконуватись умови (20). Якщо ведуче переднє колесо характерною є зміна положення між колісною осі C_1C_2 . Визначаючи значення сили тяги з боку ведучого колеса на ведене, використовуючи (9) під час руху по похилій площині $F_{21} = (k \cdot \cos\alpha + r \cdot \sin\alpha) \cdot P$, знайдемо для досягнення її найбільшої величини необхідне значення сили $F_{12} = (k \cdot \cos\alpha + r \cdot \sin\alpha) \cdot P / (r \cdot \cos^2 0,5\alpha)$ та умову руху без ковзання ведучого колеса

$k + (1 + \cos^2 0,5\alpha + I_c / mr^2)(k \cdot \cos\alpha + r \cdot \sin\alpha) / (\cos^2 0,5\alpha) < (1 + I_c / mr^2) f_c r$
за керуючого моменту двигуна

$$M > \left[k + (k \cdot \cos\alpha + r \cdot \sin\alpha) / (1 + \cos^2 0,5\alpha) \right] \cdot P.$$

г) похила площина із перешкодами (площина із ламаним профілем). Рух по цій площині можна розглядати як перехід з однієї площини (19), (20) на площину із новим кутом нахилу.

1.4. Рух по сходах (рис. 16):

а) ведуче переднє колесо ($M_1 = M$, $M_2 = 0$). У разі висоти щабля сходинок $H < r$, де r -радіус колеса, умовою руху є

$$M > 2 \cdot \left\{ \sqrt{H \cdot (2r - H)} + k(r - H) \cdot r^{-1} \right\} \cdot P \quad (21)$$

під час одночасній умові відсутності ковзання ведучого колеса

$$\operatorname{tg}\alpha < f_c + k/r. \quad (22)$$

Якщо $H > r$, то умова руху без ковзання $r < k + 0,5(k + rf_c) \operatorname{ctg}\alpha - 0,5I_c / mr$ не виконується.

б) ведучі всі колеса ($M_1 = M_2 = M$). Із розглянутих випадків (16), (19), (21) випливає, що рух можливий для сходів за умови $H < r$ та виконанні умови (21) для подвоєного моменту $2M$. Для сходів висотою $H > r$ виконання

необхідних умов (16), (17) неможливе для фрикційного контакту поверхонь коліс та площини. Рух по поверхні з перешкодами та по сходах висотою $H > r$ може бути можливим при забезпеченні умов не проковзування коліс реалізацією спеціального «жорсткого» зчеплення (типу шипів чи гусениці) ведучих коліс з поверхнею. В цьому випадку необхідною умовою для забезпечення руху буде умова (17).

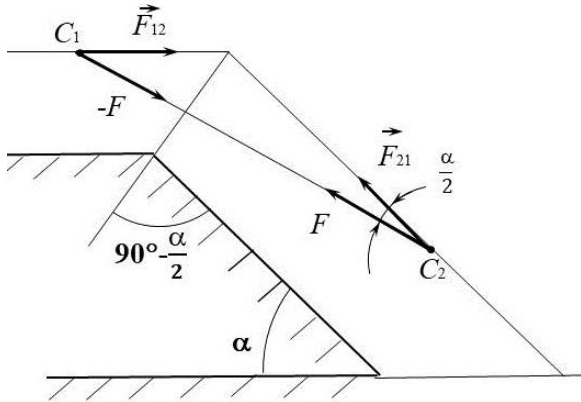


Рис. 15. Вихід із похилої площини.
Розподіл сил

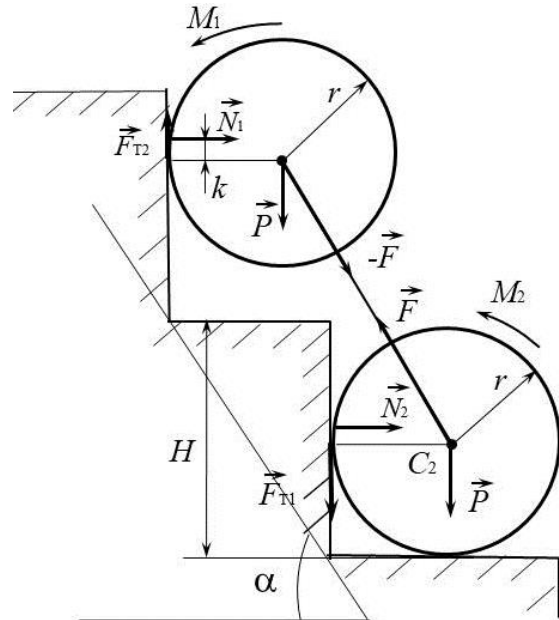


Рис. 16. Рух по сходах

2. Шасі з двопроменевою траверсою з обертанням (рис. 5).

2.1. Рух по похилій площині. Умовою руху є керуючий момент двигуна

$$M > 2(r \cdot \sin \alpha + k \cdot \cos \alpha) \cdot P \quad (23)$$

для кутів нахилу площини (20). Під час виходу з похилої площини (рис. 15) для моменту двигуна та умови не ковзання отримаємо відповідно значення

$$M > \left[2k + (k \cdot \cos \alpha + r \cdot \sin \alpha) \cdot (1 + \cos^2 0,5\alpha) \right] \cdot P, \\ 2k + \left[1 + (\cos 0,5\alpha)^2 + I_c / mr^2 \right] \cdot (k \cdot \cos \alpha + r \cdot \sin \alpha) \cdot (\cos 0,5\alpha)^{-2} < \quad (24) \\ < (1 + I_c / mr^2) \cdot r \cdot f_c.$$

2.2. Рух по горизонтальній площині з перешкодами (рис. 17). Для подолання перешкоди висотою

$$H = C_1 E = 2 \cdot (r + 3r_1) \cdot \sqrt{1 - (r_1 + b)^2 / (r_1 + r)^2} \quad (25)$$

необхідний момент двигуна

$$M > P \cdot CC_3 = P \cdot (r + 3r_1). \quad (26)$$

За умови відсутності ковзання колеса знаходимо

$$H < 2(r + 3r_1) \cdot \cos\beta. \quad (27)$$

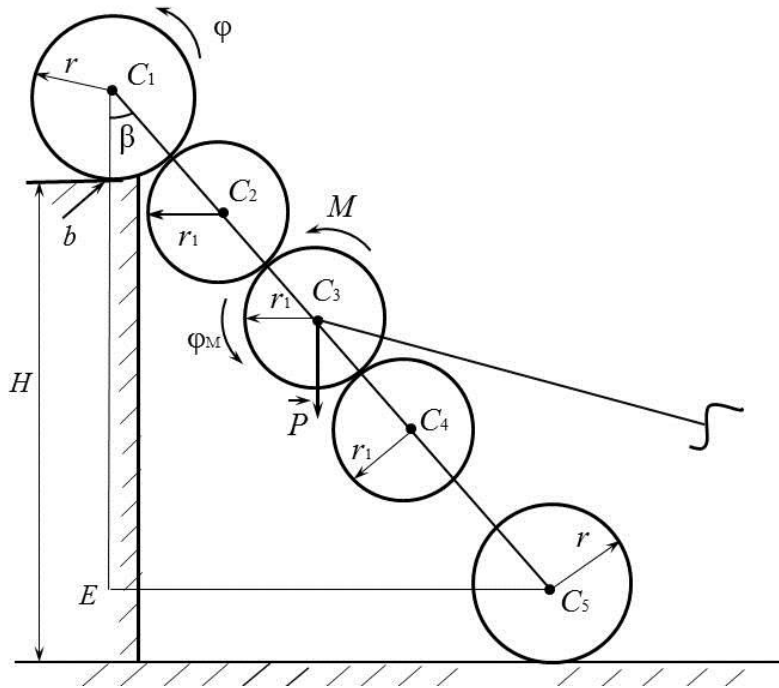


Рис. 17. Рух із перешкодами

2.3. *Рух по сходах.* Умови руху по сходах подібні умовам (26) та (27). У разі забезпечення відсутності ковзання коліс «жорстким» зчепленням, для руху потрібно виконання умову (26) при висоті (25).

3. Шасі з трипроменевою траверсою з обертанням

3.1. *Рух по похилій площині.* Для необхідного моменту керування двигуна отримаємо значення

$$M > 2(r \cdot \sin\alpha + k \cdot \cos\alpha) \cdot P, \quad (28)$$

для кута α нахилу площини (20).

3.2. *Рух по горизонтальній площині з перешкодами та рух по сходах.* Знайдемо максимальну висоту перешкоди (або щабля сходів) (рис. 18) за умов «жорсткого» зчеплення коліс із поверхнею

$$H_{max} = \sqrt{3} \cdot (r + 3r_1) \cdot \cos\beta, \quad \sin\beta = r / \sqrt{3} \cdot (r + 3r_1) \quad (29)$$

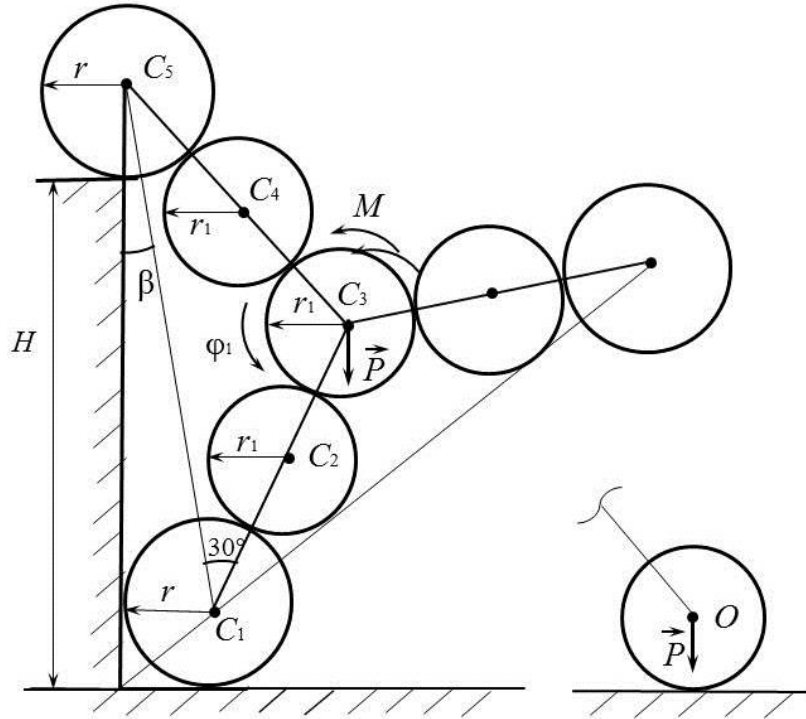


Рис. 18. Рух з перешкодами та під час фрикційного контактування

$$H_{max} < 2 \cdot (r + 2r_1) \cdot \cos\beta. \quad (30)$$

Необхідний момент двигуна

$$M_{max} = P \cdot C_1C_2 = P \cdot (r + 3 \cdot r_1). \quad (31)$$

4. Шасі з чотирипроменевою траверсою з обертанням (рис. 9)

4.1. Під час руху по похилій площині умови руху визначаються виразами (20), (29).

4.2. Для руху по горизонтальній площині з перешкодами та руху по сходах (рис. 19) отримаємо максимальну висоту перешкоди (або щабля сходів)

$$H_{max} = 2r + 3r_1, \quad (32)$$

та керуючий момент двигуна

$$M_{max} = (r + 3r_1 + k) \cdot P. \quad (33)$$

Умова непроковзування колеса $k = 0,5 \cdot f_c (r + I_c / mr) > 0$ завжди виконується.

Для порівняння можливостей кінематичних схем шасі під час руху по поверхні різного профілю та необхідних моментних характеристиках двигуна приводу системи керування, отримані результати зведемо в таблицю.

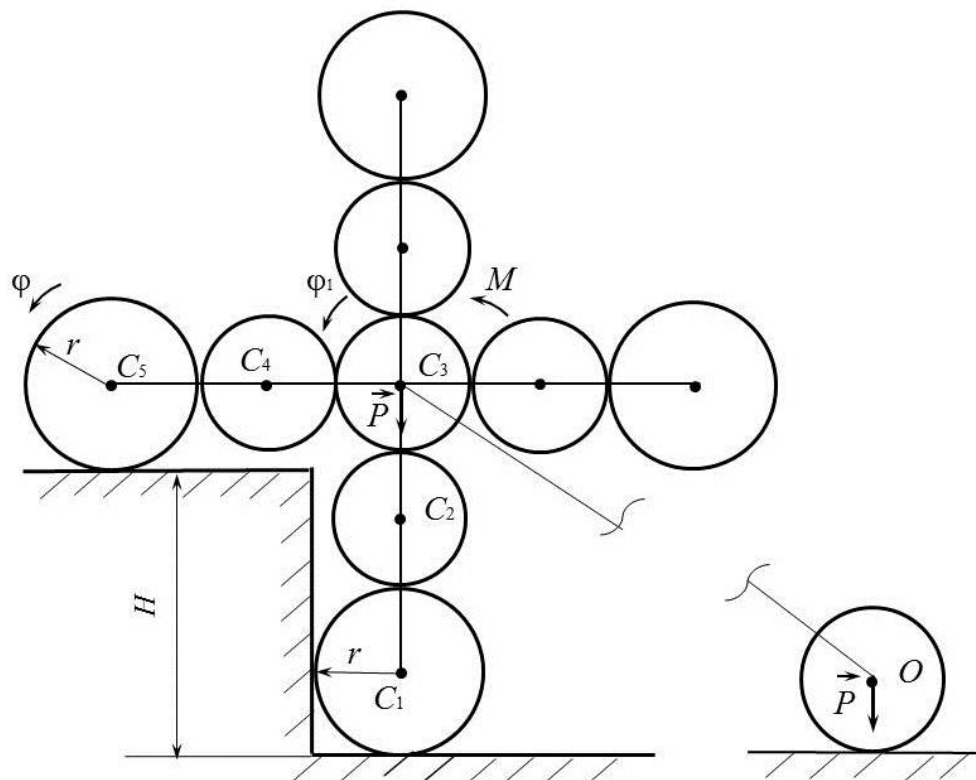


Рис. 19. Рух із перешкодами шасі з чотирипроменевою траверсою

Таблиця.

Зв'язок моменту двигуна із профілем поверхні руху та типом шасі (У дужках вказані номери посилань в тексті. Знак \uparrow означає більше значення характеристики поверхні за визначене формулою)

Тип шасі	Поверхня руху			Кількість ведучих коліс	Момент двигуна
	профіль	характеристика			
		фрикційне зчеплення	нерухоме зчеплення		
одноколісне рис. 11	горизонтальна	(13)		1	(13)
		(14)		1+1	(14)
	горизонтальна із перешкодами	(15), $H < r$		1	(15)
		(15)	$H > r$	1+1	(17)
	похила	(18)	\uparrow (18)	1	(19)
		(20)	\uparrow (20)	1+1	(20)
	сходи	(22), $H < r$		1	(21)
		(22), $H < r$		1+1	(21)
			$H > r$	1+1	(17)

Тип шасі	Поверхня руху			Кількість ведучих коліс	Момент двигуна
	профіль	характеристика			
		фрикційне зчеплення	нерухоме зчеплення		
двопроменева траверса рис. 5	похила	(20)	↑ (24)	1	(24)
	горизонтальна із перешкодами	(27)	↑ (25)	1	(26)
	сходи	(27)	(25)	1	(26)
трипроменева траверса рис. 6	похила	(20)	↑ (20)	1	(28)
	горизонтальна із перешкодами	(30)	(29)	1	(31)
	сходи	(30)	(29)	1	(31)
чотирипроменева траверса рис. 7	похила	(20)	↑ (20)	1	(28)
	горизонтальна із перешкодами	(32)	(32)	1	(33)
	сходи	(32)	(32)	1	(33)

Висновки

Отримані динамічні моделі основних типів шасі враховують профіль поверхні руху для визначення умов нековзання та необхідного моменту двигуна для керованості шасі. Вони дозволяють провести попередній розрахунок головних геометричних та параметрів шасі та моменту двигуна приводу. Вперше проведена оцінка параметрів профілю пересіченої поверхні, характеру зчеплення коліс з поверхнею та моменту двигуна для можливості подолання перешкоди та забезпечення керованості системи. Показано, що доступними формами профілю поверхні для руху шасі з відповідними колісними приводами можуть бути поверхні з виступами та впадинами, зі сторонніми предметами – завалами, похилі площини, сходи та сходові марші.

Список використаної літератури

1. *Залипка В. Д.* Особливості створення та застосування наземних роботизованих комплексів у провідних країнах світу та Україні// Науковий вісник НЛТУ України.- 2022.- Т. 32- № 4. - С. 60–65.
2. *Кириченко І. В.* Наземні роботизовані комплекси: основи та майбутнє// Молодий вчений. Вип.12(100). -2021.- С. 16-20.
3. *Anis Koubaa.* Robot Opereting System// Berlin: Springer.- 2019.
4. *Guslyakov O. M., Dovgopoliy A. S., Shepkov I. B.* Critical technologies for the creation of ground robotic complexes of heavy and medium classes// Armament and military equipment. – 2020. – [https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.1\(25\).24-34](https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.1(25).24-34).
5. Роботизована платформа Скорпіон [електронний ресурс] режим доступу: <https://temerland.com/rishennya/robotizovana-platforma-scorpion/>
6. Роботизована платформа Ласка 2.0 [електронний ресурс] режим доступу: <https://temerland.com/rishennya/robotizovana-platforma-laska-2-0/>
7. Безпілотна роботизована шестиколісна платформа ГНОМ [електронний ресурс] режим доступу: <https://temerland.com/rishennya/bezpilotna-robotyzovana-shestykolisna-platforma-gnom/>
8. *Zoran Gacovski.* Mobile Robots – Current Trends.//Rijeka: In Tech. - 2011.- 414 p.
9. *Kuprinenko O. M.* Problems of creating ground robotic complexes for the needs of the Armed Forces of Ukraine//Armament and military equipment. – 2021. – [https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.4\(32\)](https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.4(32)). P. 26-34.
10. *Janusz Kasprzyk.* Robot Intelligence Technology and Applications// Warsaw: Springer. - 2014.- 610 p.
11. *Павловський М. А.* Теоретична механіка//К .-Техніка - 2002.- 512с.
12. *Маринич Ю. М., Збруцький О. В.* Патент № 114544 на винахід «Безконтактний двигун постійного струму». - 2017.
13. *Кореняко А. С.* Теорія механізмів і машин/ Під ред. М. К. Афанасьєва. — К.: Вища школа: Головне вид-во, 1987. – 206 с.