

УДК 681.5

Б.В. Сава, І.Р. Козбур, к.т.н., доц. В.Р. Медвідь

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИВОДАМИ КРОКУЮЧОГО ШАСІ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

B. Sava, I. Kozbur, Ph.D., Assoc. Prof., V. Medvid

### RESEARCH OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF DRIVES OF STEP MOBILE CHASSIS

Крокуючі шасі мобільних автономних роботизованих систем, у порівнянні з традиційними, забезпечує високу адаптацію до нерівностей опорної поверхні, принципово більшу маневреність, що допускає переміщення машини в довільному напрямку, повороти на місці, опорну прохідність по ґрунтах з низькою несучою здатністю. Крокуюча машина використовує закладені в принципі крокування можливі розв'язки руху корпусу машини в залежності від дороги. За рахунок зміни руху стоп щодо корпусу крокуюча машина може забезпечити рівномірний і прямолінійний рух корпусу машини при переміщенні по поверхні з нерівностями, що досягають величини дорожнього просвіту машини.

Розглянемо проблему стабілізації руху крокуючого апарата (рис. 1) з метою забезпечення заданої програмної кінематики. Досліджується модель, у якій масивний корпус опирається на ноги, що не мають маси. Керування здійснюється за допомогою моментів, що діють у шарнірах ніг.

Нехай  $OXYZ$  – головні центральні осі інерції корпусу. Положення осей  $OXYZ$  щодо абсолютних  $O_1\xi\eta\zeta$  будемо характеризувати координатами центра мас апарата  $\xi\eta\zeta$  і кутами  $\varphi, \theta, \gamma$  (рис. 1). Обрані кути визначають положення корпусу відносно нерухомо орієнтованих осей з початком у центрі мас. Проекції  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  вектора кутової швидкості корпусу на осі  $OXYZ$  пов'язані формулами:

$$\dot{\phi} = (\omega_z \cos \gamma - \omega_x \sin \gamma) / \cos \theta; \quad \theta = \omega_x \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma; \quad \gamma = \omega_y - \phi \sin \gamma \quad (1)$$

рівняння руху корпусу приймають вигляд

$$m\ddot{\xi} = \sum_i N_{i\xi} + F_\xi; \quad m\ddot{\zeta} = \sum_i N_{i\zeta} + F_\zeta; \quad m\ddot{\eta} = \sum_i N_{i\eta} + F_\eta; \quad A\dot{\omega}_x = M_x - (C - B)\omega_x\omega_z; \\ B\dot{\omega}_y = M_y - (A - C)\omega_z\omega_x; \quad C\dot{\omega}_z = M_z - (B - A)\omega_x\omega_y. \quad (2)$$

де  $N_i = (N_{i\xi}, N_{i\eta}, N_{i\zeta})$  – реакція поверхні в точці опори;  $F$  – рівнодіюча всіх інших сил, прикладених до апарата;  $m$  – маса;  $A, B, C$  – моменти інерції корпусу;  $M = (M_x, M_y, M_z)$  – вектор моменту щодо центру мас всіх сил, прикладених до апарата:

$$M = \sum_i r_{ci} * N_i + M_F; \quad (3)$$

де  $r_{ci}$  радіус-вектори точок опори;  $M_F$  – момент сил, що не є реакціями опори.

Прийmemo, що кожна нога складається із двох ланок – стегна та гомілки, має одноступінчатий шарнір у коліні й двоступеневий шарнір у точці підвісу стегна до корпусу. Кут у коліні між гомілкою й стегном позначимо через  $q$ , кут між негативним напрямком осі  $OZ$  і стегном – через  $\beta$ , а кут між віссю  $OX$  та проекцією стегна на площину  $OXY$  – через  $\alpha$  (мал. 1). Для визначення реакції поверхні в точці опори маємо вирази:

$$N_x = \frac{M_\alpha \cos \alpha}{L^S} + \frac{M_\alpha L_S - M_q L^S}{l_1 l_1 \sin q} \cos q; \quad N_y = -\frac{M_\alpha \cos \alpha}{L^S} + \frac{M_\beta L_S - M_q L^S}{l_1 l_1 \sin q} \sin \alpha; \\ N_z = -\frac{M_\beta L_C - M_q L^C}{l_1 l_1 \sin q} \quad (4)$$

у яких відповідно  $M_\alpha, M_\beta, M_q$  – керуючі шарнірні моменти;

$$L^S = l_1 \sin \phi - l_2 \sin \beta; \quad L_S = l_1 \sin \phi; \quad L^c = l_1 \cos \phi - l_2 \cos \beta; \quad L_C = l_1 \cos \phi. \quad (5)$$

$l_1$  - довжина гомілки;  $l_2$  - довжина стегна;  $\varphi = q + \alpha - \beta$  – кут між гомілкою й негативним напрямком осі  $OZ$  (мал. 1).

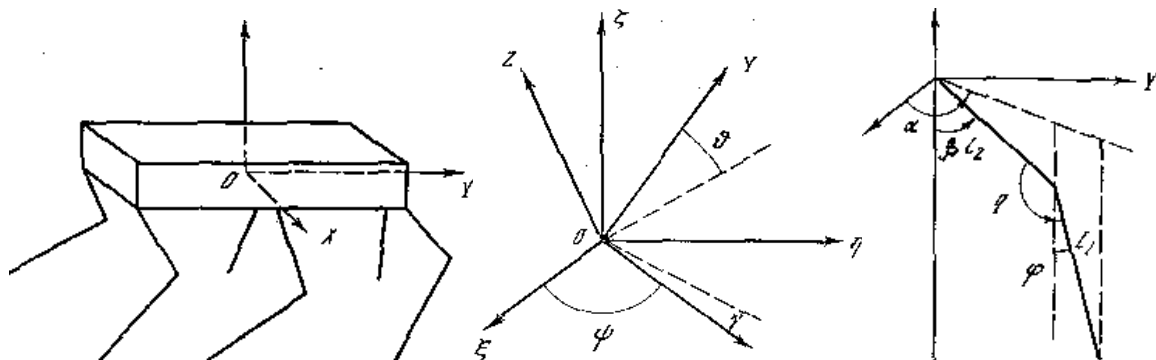


Рис. 1 – Модель та кінематика крокуючого апарату. Кутові характеристики корпусу

Узагальнені координати апарату  $Q$  визначаються за допомогою чисельного інтегрування рівнянь (2) з врахуванням (3) і (4). Таким шляхом здійснюється імітація реального руху корпусу апарату й перевірка ефективності алгоритму керування.

Завдання керування корпусом апарату сформулюємо в такий спосіб. Нехай у фазовому просторі ( $Q$ ) узагальнених координат і швидкостей корпусу задана програмна крива. Потрібно за рахунок керування шарнірними моментами ніг, що перебувають в опорній фазі, забезпечити вихід фазових координат на програмну криву.

$$Q_H = Q_H(t), \quad \dot{Q}_H = \dot{Q}_H(t). \quad (6)$$

Рівняння руху (1), (2) можна записати у вигляді похідних другого порядку від узагальнених координат

$$\ddot{Q} = f(Q, \dot{Q}, N, M, W) \quad (7)$$

де через  $W$  позначені всі реальні збурювання, що діють на апарат. Під збурюванням  $W$  розуміємо, наприклад, відхилення геометричних параметрів, ваги й моментів інерції корпусу від розрахункових значень, помилки визначення напрямку й початку головних центральних осей інерції, помилки відпрацювання керуючих моментів двигунами, невідомі зовнішні сили, що діють на апарат, і т.д. Позначимо

$$u = f(Q, \dot{Q}, N, M, 0) \quad (8)$$

$$v = f(Q, \dot{Q}, N, M, W) - f(Q, \dot{Q}, N, M, 0) \quad (9)$$

Таким чином, являє собою праву частину дозволених щодо других похідних рівнянь руху за умови, що збурювання відсутні, відповідно рівняння (7) приймає вигляд:

$$\ddot{Q} = u - v$$

У подальшому отримуємо лінеаризовану математичну модель, що описує динаміку гідроприводу ноги крокуючої машини (КМ). У гідроприводі використані розподільники із пропорційним керуванням, насос із LS-керуванням (load sensing – чутливий до навантаження) та гідроциліндри.

Моделювання гідроприводу, базується на методах простору станів.