

## АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ РУХУ ПРИЧЕПА-ВІЗКА ДЛЯ ЗБИРАННЯ ОЧОСАНОВОГО ВОРОХУ

Леженкін О.М., д.т.н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

*Тел. (0619) 42-68-74*

**Анотація** – в статті приводиться методика дослідження стійкості руху причепа-візка для збирання очосаного вороху.

**Ключові слова** - збиральний агрегат, стійкість руху, причеп-візок, характеристичне рівняння.

*Постановка проблеми.* Якісне виконання технологічного процесу збирання зернових культур забезпечується за рахунок регулювання агрегату, а також за рахунок забезпечення стійкості його руху. Причипний збиральний агрегат представляє собою три ланкову механічну систему, що включає в себе колісний трактор, збиральну машину для збирання очосаного вороху і причеп-візок. Загальний вигляд збирального агрегату наведений на рис.1.



Рисунок 1 – Загальний вигляд збирального агрегату.

В процесі руху ланки агрегату починають відхилятися від основного руху. Щоб забезпечити виконання збирання згідно агротехнічних вимог потрібно добитися робочого ходу без скривлення траєкторії.

*Аналіз публікацій.* Теоретичні основи стійкості руху механічних систем розроблені проф. Ляпуновим А.М. [1]. П.М. Василенко використовуючи загальну теорію стійкості руху розробив методику обґрунтування стійкості руху сільськогосподарських агрегатів [2, 3]. Подальший розвиток стійкості руху сільськогосподарських машин і агрегатів отримало в роботах Гячева Л.В. [4, 5]. Стосовно до умов роботи причіпних збиральних машин питання їх стійкості викладені в роботах [6, 7, 8].

*Невирішені завдання.* Загальні питання теорії стійкості відомі [1, 2, 3]. Дослідження стійкості руху причіпного збирального агрегату приведено в роботі [6]. Але, розгляд стійкості руху три ланкового збирального агрегату викликає визначені складності, так як, агрегат (рис.2) має п'ять ступенів свободи і внаслідок цього отримується система п'яти диференціальних рівнянь [7], що мають доволі громіздкі коефіцієнти. Спроба спростити отримані вирази за рахунок зменшення числа ступенів свободи механічної системи бажаного результату не принесло. Вирази все одно були достатньо складними [9].

Спростити дослідження стійкості руху збирального агрегату можна за рахунок розгляду кожної ланки окремо, замінивши при цьому зв'язки їх реакціями.

Стійкість руху трактора при агрегуванні збирального агрегату розглянута в роботі [10], стійкість руху збиральної машини приведена в роботі [11]. Обґрунтування стійкості руху причепа-візка для збирання очосаного вороху вимагає окремо розгляду.

*Постановка завдання.* З метою обґрунтування критичної швидкості руху причепа-візка для збирання очосаного вороху скласти характеристичне рівняння і проаналізувати його коефіцієнти.

*Основна частина.* Розглянемо рух причепа-візка по плоскій горизонтальній поверхні з переносною швидкістю  $V = \text{const}$ . Зв'язок із збиральною машиною замінимо її реакцією.

У відносному русі причеп-візок здійснює плоско-паралельний рух з двома ступенями свободи.

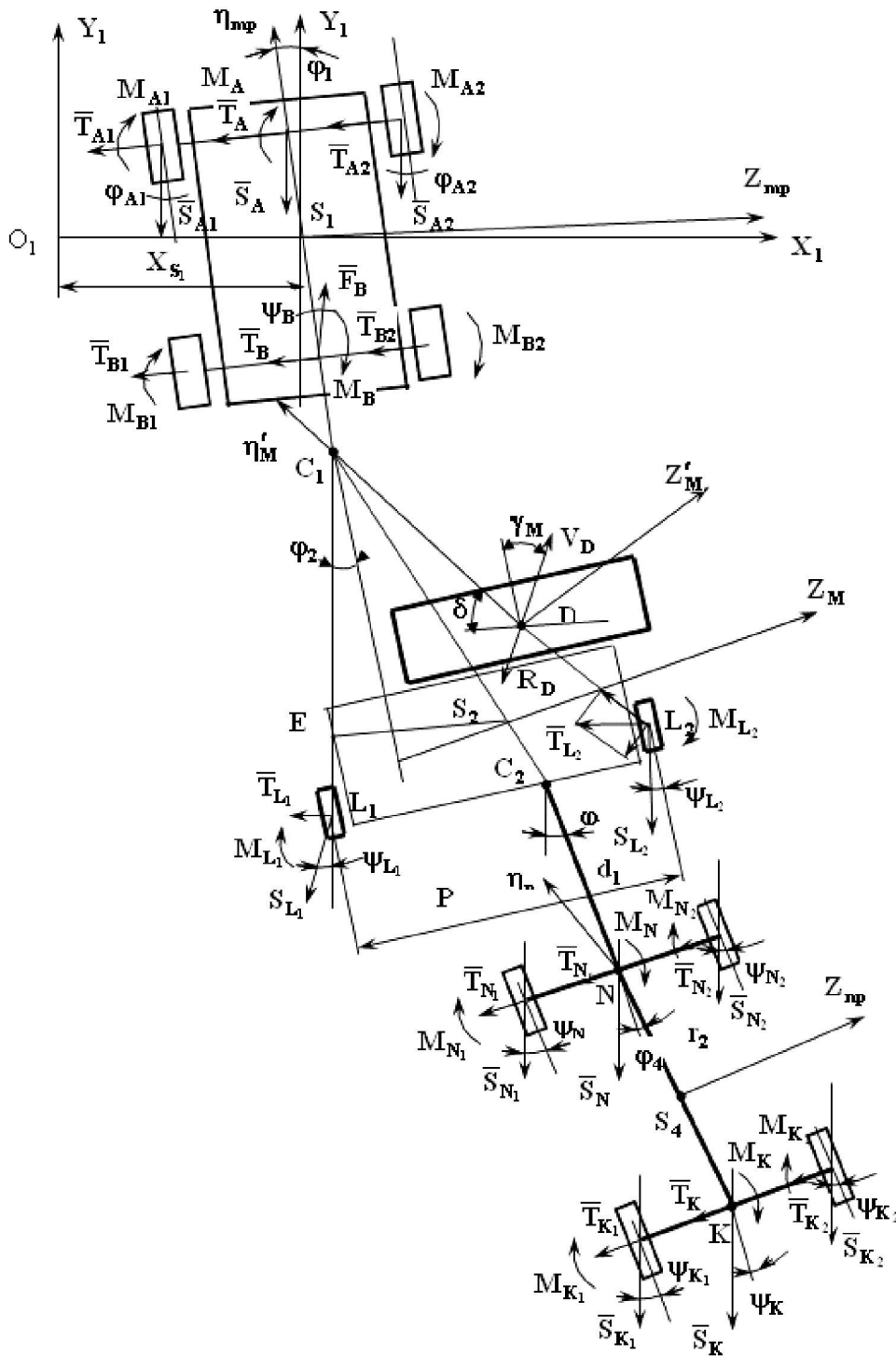


Рисунок 2 – Розрахункова схема збирального агрегату.

На причеп-візок діють наступні сили і моменти сил:

Складемо диференціальні рівняння руху причепа-візка, використовуючи рівняння Лагранжа II роду в узагальнених координатах. В якості узагальнених координат приймаємо кути  $\varphi_3$  і  $\varphi_4$ .

Диференціальні рівняння руху причепа-візка мають вигляд:

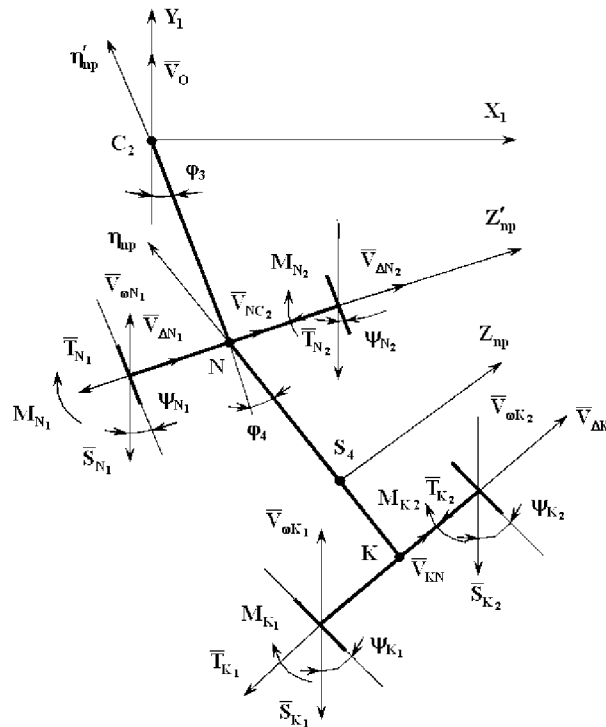


Рисунок 3 – Схема сил, прикладених до причепа-візка.

$$\begin{aligned} d_0 \ddot{\phi}_3 + d_1 \dot{\phi}_3 + d_2 \phi_3 + d_3 \phi_3 + d_4 \ddot{\phi}_4 + d_5 \dot{\phi}_4 &= 0; \\ l_0 \ddot{\phi}_3 + l_1 \dot{\phi}_3 + l_2 \phi_3 + l_3 \ddot{\phi}_4 + l_4 \dot{\phi}_4 + l_5 \phi_4 + l_6 \phi_4 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

$$d_0 = I_{C_2} \cdot M + m_{np} \cdot d_1^2 \cdot M - d_1 \cdot r_2 \cdot K \cdot m_{np};$$

$$d_1 = V_{O_1} \cdot I_{C_2} \cdot M \cdot k_N + V_{O_1} \cdot m_{np} \cdot d_1^2 \cdot M \cdot k_N + V_{O_1} \cdot r_2 \cdot d_1 \cdot m_{np} \cdot M \cdot k_N -$$

$$\text{де } -V_{O_1} \cdot r_2 \cdot d_1 \cdot K \cdot k_N - V_{O_1} \cdot d_1 \cdot r_2 \cdot K \cdot k_N \cdot m_{np};$$

$$d_2 = -N \cdot d_1;$$

$$d_3 = -N \cdot V_0;$$

$$d_4 = m_{np} \cdot r_2 \cdot d_1 \cdot K - I_N \cdot K - m_{np} \cdot r_2^2 \cdot K;$$

$$d_5 = -V_{O_1} \cdot k_N \cdot K \cdot I_N - m_{np} \cdot r_2^2 \cdot K \cdot V_0 \cdot k_N;$$

$$l_0 = m_{np} \cdot r_2 \cdot d_1;$$

$$l_1 = V_0 \cdot k_N \cdot m_{np} \cdot r_2 \cdot d_1;$$

$$l_2 = -M \cdot d_1;$$

$$l_3 = I_N + m_{np} \cdot r_2^2;$$

$$l_4 = V_{O_1} \cdot k_N \cdot I_N + V_0 \cdot k_N \cdot m_{np} \cdot r_2^2;$$

$$l_5 = -d_2 \cdot M;$$

$$l_6 = -V_{O_1} \cdot M. \quad (2)$$

Складемо характеристичне рівняння системи диференціальних рівнянь (1), для цього підставимо в рівняння (1)  $\phi_3 = \delta e^{\lambda t}$  і  $\phi_4 = \epsilon e^{\lambda t}$ :

$$\begin{aligned}
& d_0 \cdot \delta e^{\lambda t} \cdot \lambda^3 + d_1 \cdot \delta e^{\lambda t} \cdot \lambda^2 + d_2 \cdot \delta e^{\lambda t} \cdot \lambda + d_3 \cdot \delta e^{\lambda t} + d_4 \cdot \varepsilon e^{\lambda t} \cdot \lambda^3 + d_5 \cdot \varepsilon e^{\lambda t} \cdot \lambda^3 = \\
& = \delta e^{\lambda t} (d_0 \cdot \lambda^3 + d_1 \cdot \lambda^2 + d_2 \cdot \lambda + d_3) + \varepsilon e^{\lambda t} \cdot (d_4 \cdot \lambda^3 + d_5 \cdot \lambda^3) = 0; \\
& \ell_0 \cdot \delta e^{\lambda t} \cdot \lambda^3 + \ell_1 \cdot \delta e^{\lambda t} \cdot \lambda^2 + \ell_2 \cdot \delta e^{\lambda t} \cdot \lambda + \ell_3 \cdot \varepsilon e^{\lambda t} \cdot \lambda^3 + \ell_4 \cdot \varepsilon e^{\lambda t} \cdot \lambda^2 + \\
& + \ell_5 \cdot \varepsilon e^{\lambda t} \cdot \lambda + \ell_6 \cdot \varepsilon e^{\lambda t} = \delta e^{\lambda t} (\ell_0 \cdot \lambda^3 + \ell_1 \cdot \lambda^2 + \ell_2 \cdot \lambda) + \\
& + \varepsilon e^{\lambda t} (\ell_3 \cdot \lambda^3 + \ell_4 \cdot \lambda^2 + \ell_5 \cdot \lambda + \ell_6) = 0.
\end{aligned} \tag{3}$$

Позначимо через:

$$\begin{aligned}
r_{11} &= d_0 \cdot \lambda^3 + d_1 \cdot \lambda^2 + d_2 \cdot \lambda + d_3; \\
r_{12} &= d_4 \cdot \lambda^3 + d_5 \cdot \lambda^3; \\
r_{21} &= \ell_0 \cdot \lambda^3 + \ell_1 \cdot \lambda^2 + \ell_2 \cdot \lambda; \\
r_{22} &= \ell_3 \cdot \lambda^3 + \ell_4 \cdot \lambda^2 + \ell_5 \cdot \lambda + \ell_6.
\end{aligned} \tag{4}$$

Характеристичні рівняння системи (1) можна представити у вигляді визначника другого порядку:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{vmatrix} = 0 \tag{5}$$

Розкриємо визначник (5).

$$r_{11} \cdot r_{22} - r_{21} \cdot r_{12} = 0. \tag{6}$$

Підставимо значення  $r_{ij}$  в рівняння (5):

$$\begin{aligned}
& (d_0 \cdot \lambda^3 + d_1 \cdot \lambda^2 + d_2 \cdot \lambda + d_3) \cdot (\ell_3 \cdot \lambda^3 + \ell_4 \cdot \lambda^2 + \ell_5 \cdot \lambda + \ell_6) - \\
& - (d_4 \cdot \lambda^3 + d_5 \cdot \lambda^3) \cdot (\ell_0 \cdot \lambda^3 + \ell_1 \cdot \lambda^2 + \ell_2 \cdot \lambda) = \lambda^6 (d_0 \ell_3 - d_4 \ell_0) + \\
& + \lambda^5 (d_0 \ell_4 + d_1 \ell_3 - d_4 \ell_1 - d_5 \ell_0) + \lambda^4 (d_0 \ell_5 + d_1 \ell_4 + d_2 \ell_3 - d_2 \ell_2 - d_5 \ell_1) + \\
& + \lambda^3 (d_0 \ell_6 + d_1 \ell_5 + d_2 \ell_4 + d_3 \ell_3 - d_5 \ell_2) + \lambda^2 (d_1 \ell_6 + d_2 \ell_5 + d_3 \ell_4) + \\
& + \lambda (d_2 \ell_6 + d_3 \ell_5) + d_3 \ell_6 = 0.
\end{aligned} \tag{7}$$

Характеристичне рівняння системи диференціальних рівнянь має вигляд:

$$\lambda^6 \cdot p_0 + \lambda^5 \cdot p_1 + \lambda^4 \cdot p_2 + \lambda^3 \cdot p_3 + \lambda^2 \cdot p_4 + \lambda \cdot p_5 + p_6 = 0. \tag{8}$$

Коефіцієнти характеристичного рівняння (8) мають значення:

$$\left. \begin{aligned}
p_0 &= d_0 \ell_3 - d_4 \ell_0; \\
p_1 &= d_0 \ell_4 + d_1 \ell_3 - d_4 \ell_1 - d_5 \ell_0; \\
p_2 &= d_0 \ell_5 + d_1 \ell_4 + d_2 \ell_3 - d_2 \ell_2 - d_5 \ell_1; \\
p_3 &= d_0 \ell_6 + d_1 \ell_5 + d_2 \ell_4 + d_3 \ell_3 - d_5 \ell_2; \\
p_4 &= d_1 \ell_6 + d_2 \ell_5 + d_3 \ell_4; \\
p_5 &= d_2 \ell_6 + d_3 \ell_5; \\
p_6 &= d_3 \ell_6.
\end{aligned} \right\} \tag{9}$$

Таким чином, характеристичне рівняння не має нульових корнів. Рух причепа-візка є асимптотично стійким, якщо виконується умова стійкості:

$$p_0 > 0; p_1 > 0; p_2 > 0; p_3 > 0; p_4 > 0; \\ p_5 > 0; p_6 > 0. \quad (10)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} p_1 & p_0 & 0 & 0 \\ p_3 & p_2 & p_1 & p_0 \\ p_5 & p_4 & p_3 & p_2 \\ 0 & 0 & p_5 & p_4 \end{vmatrix} > 0$$

Проаналізуємо нерівності (10), для чого введемо коефіцієнти:

$$\begin{aligned} D_0 &= I_{C_2} \cdot M + m_{np} \cdot d_1^2 \cdot M - d_1 \cdot r_2 \cdot K \cdot m_{np}; \\ D_1 &= I_{C_2} \cdot M \cdot k_N + m_{np} \cdot d_1^2 \cdot M \cdot k_N + r_2 \cdot d_1 \cdot m_{np} \cdot M \cdot k_N - d_1 \cdot r_2 \cdot K \cdot k_N \cdot m_{np}; \\ D_2 &= N \cdot d_1; \\ D_3 &= N; \\ D_4 &= m_{np} \cdot r_2 \cdot d_1 \cdot K - I_N \cdot K - m_{np} \cdot r_2^2 \cdot K; \\ D_5 &= k_N \cdot K \cdot I_N + m_{np} \cdot r_2^2 \cdot K \cdot k_N; \\ L_0 &= m_{np} \cdot r_2 \cdot d_1; \\ L_1 &= k_N \cdot m_{np} \cdot r_2 \cdot d_1; \\ L_2 &= M \cdot d_1; \\ L_3 &= I_N + m_{np} \cdot r_2^2; \\ L_4 &= k_N \cdot I_N + k_N \cdot m_{np} \cdot r_2^2; \\ L_5 &= d_2 \cdot M; \\ L_6 &= M. \end{aligned} \quad (11)$$

Тоді коефіцієнти (4) системи диференціальних рівнянь (1) руху причепа-візка приймають вигляд:

$$\begin{aligned} d_0 &= D_0; & \ell_0 &= L_0; \\ d_1 &= D_1 \cdot V_{O_1}; & \ell_1 &= V_0 \cdot L_1; \\ d_2 &= -D_2; & \ell_2 &= -L_2; \\ d_3 &= -V_{O_1} \cdot D_3; & \ell_3 &= L_3; \\ d_4 &= D_4; & \ell_4 &= V_0 \cdot L_4; \\ d_5 &= -V_{O_1} \cdot D_5; & \ell_5 &= -L_5; \\ & & \ell_6 &= -V_{O_1} \cdot L_6. \end{aligned} \quad (12)$$

Підставимо у вираз (12) значення коефіцієнтів  $d_i$  і  $\ell_i$ .

$$\begin{aligned} P_0 &= D_0 L_3 - D_4 L_0 > 0; \\ P_1 &= D_0 \cdot V_0 \cdot L_4 + D_1 \cdot V_{O_1} \cdot L_3 - D_4 \cdot V_{O_1} \cdot L_1 + V_0 \cdot D_5 L_0 > 0; \\ P_2 &= -D_0 L_5 + D_1 \cdot V_{O_1} \cdot V_0 \cdot L_4 - D_2 L_3 - D_2 L_2 + D_3 \cdot V_0 \cdot V_0 \cdot L_1 > 0; \\ P_3 &= -D_0 \cdot V_0 \cdot L_6 - D_1 \cdot V_{O_1} \cdot L_5 - D_2 \cdot L_4 \cdot V_0 - D_3 \cdot V_{O_1} \cdot L_3 - D_5 \cdot V_0 \cdot L_2 > 0; \\ P_4 &= -D_1 \cdot V_{O_1} \cdot V_{O_1} \cdot L_6 + D_2 L_5 - D_3 \cdot V_0 \cdot V_0 \cdot L_4 > 0; \\ P_5 &= D_2 \cdot V_0 \cdot L_6 + D_3 \cdot V_0 \cdot L_5 > 0; \\ P_6 &= D_3 \cdot V_0 \cdot V_0 \cdot L_6 > 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Проаналізуємо отримані нерівності. Враховуючи, що  $V_{O_1} \neq 0$  можна друге, четверте, шосте і сьоме нерівності поділити на  $V_{O_1}$ , тоді тільки третє і п'яте нерівності будуть вміщувати швидкість. Виразимо критичне значення швидкості руху, при якій причеп-візок буде зберігати стійкий рух, для чого складемо третє і п'яте нерівності.

$$-D_0 \cdot L_5 + D_1 \cdot V_{O_1}^2 \cdot L_4 - D_2 \cdot L_3 - D_2 \cdot L_2 + V_0^2 \cdot D_5 \cdot L_1 - D_1 \cdot V_{O_1}^2 \cdot L_6 + D_2 \cdot L_5 + V_{O_1}^2 \cdot L_4 \cdot D_3 > 0;$$

$$D_2 \cdot L_5 - D_0 \cdot L_5 - D_2 \cdot L_3 - D_2 \cdot L_2 \triangleright D_1 \cdot V_{O_1}^2 \cdot L_6 - D_1 \cdot V_{O_1}^2 \cdot L_4 - V_0^2 \cdot D_5 \cdot L_1 - V_{O_1}^2 \cdot L_4 \cdot D_3;$$

$$V_{O_1} < \sqrt{\frac{D_2 \cdot L_5 - D_0 \cdot L_5 - D_2 \cdot L_3 - D_2 \cdot L_2}{D_1 \cdot L_6 - D_1 \cdot L_4 - D_5 \cdot L_1 - L_4 \cdot D_3}} \quad (14)$$

#### Висновок.

В результаті проведених досліджень отримана залежність критичної швидкості збирального агрегату.

#### Література.

1. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения /А.М.Ляпунов. – М.-Л.: ОНТИ, 1935. – 375 с.
2. Василенко П.М. О методике механико-математических изысканий при разработке сельскохозяйственной техники /П.М.Василенко. – М.: Бюро технической информации ГОСНИТИ, 1962. – 280 с.
3. Василенко П.М. Элементы теории устойчивости движения прицепных сельскохозяйственных машин и орудий /П.М.Василенко //Сборник трудов по земледельческой механике. – М., 1954. – С. 73-92.
4. Гячев Л.В. Динамика машинотракторных и автомобильных агрегатов /Л.В.Гячев. – Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 1976. – 192 с.
5. Гячев Л.В. Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов /Л.В.Гячев – М.: Машиностроение, 1981.
6. Леженкін О.М. Стійкість руху причіпного збирального агрегату очісую чого типу /О.М.Леженкін //Праці ТДАТА. – Мелітополь, 2005. – Вип.33. – С.26-46.
7. Леженкин А.Н. Динамика очесывающего агрегата при уборке зерновых культур /А.Н.Леженкин //Механиз.и электриф.сел.хоз-ва. – 2004. - №12. – С. 24-25.
8. Леженкин А.Н. Результаты экспериментальных исследований горизонтальных колебаний прицепного уборочного агрегата /А.Н.Леженкин //Механиз.и электриф.сел.хоз-ва. – 2008. - №1. – С.7-8.
9. Леженкин А.Н. Дифференциальные уравнения прицепного уборочного агрегата при прямолинейном и равномерном движении центра

