

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.

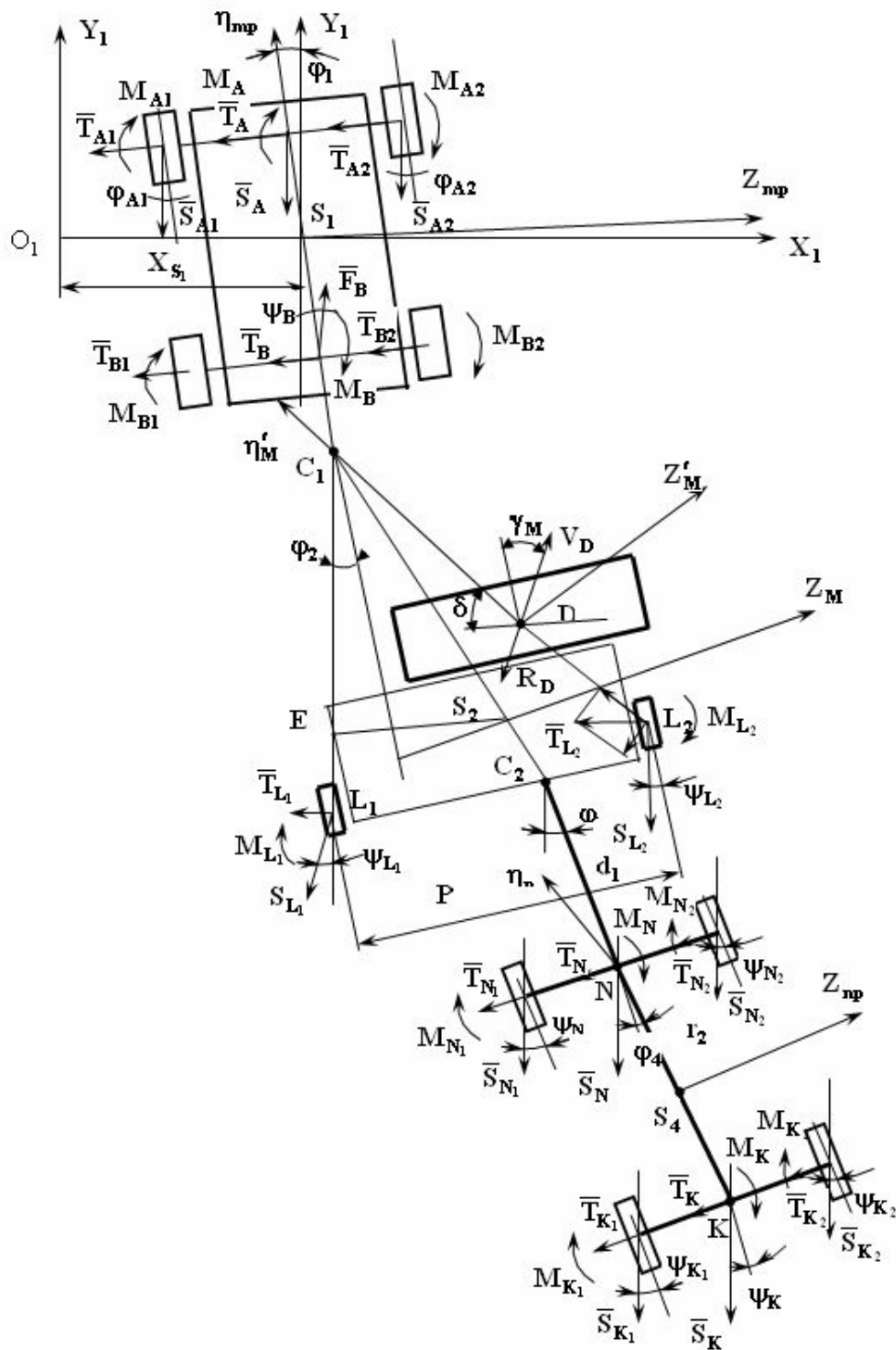


Рисунок 2 – Розрахункова схема збирального агрегату.

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 φ_3 і φ_4 .

Диференціальні рівняння руху причепа-візка мають вигляд:

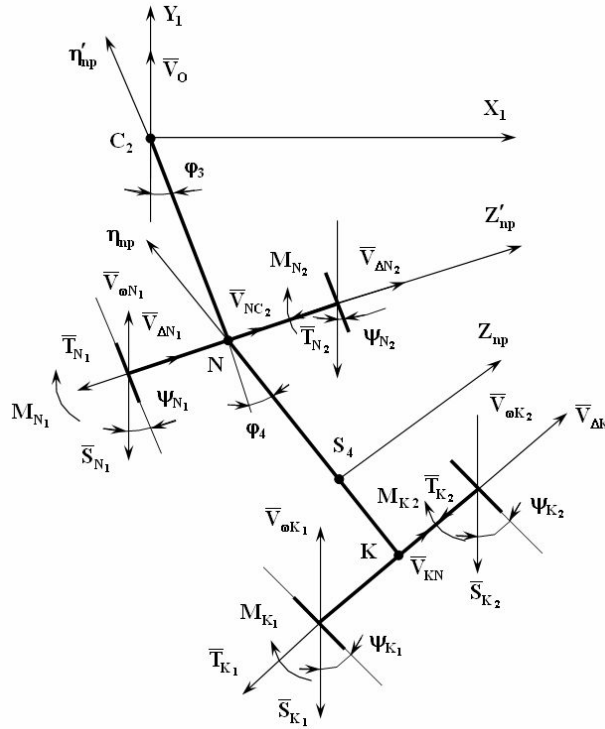


Рисунок 3 – Схема сил, прикладених до причепа-візка.

$$\begin{aligned} d_0 \ddot{\phi}_3 + d_1 \ddot{\phi}_3 + d_2 \dot{\phi}_3 + d_3 \phi_3 + d_4 \ddot{\phi}_4 + d_5 \ddot{\phi}_4 &= 0; \\ \ell_0 \ddot{\phi}_3 + \ell_1 \ddot{\phi}_3 + \ell_2 \dot{\phi}_3 + \ell_3 \ddot{\phi}_4 + \ell_4 \ddot{\phi}_4 + \ell_5 \dot{\phi}_4 + \ell_6 \phi_4 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d_0 &= I_{C_2} \cdot M + m_{np} \cdot d_1^2 \cdot M - d_1 \cdot r_2 \cdot K \cdot m_{np}; \\ d_1 &= V_{O_1} \cdot I_{C_2} \cdot M \cdot k_N + V_{O_1} \cdot m_{np} \cdot d_1^2 \cdot M \cdot k_N + V_{O_1} \cdot r_2 \cdot d_1 \cdot m_{np} \cdot M \cdot k_N - \\ \text{де } &- V_{O_1} \cdot r_2 \cdot d_1 \cdot K \cdot k_N - V_{O_1} \cdot d_1 \cdot r_2 \cdot K \cdot k_N \cdot m_{np}; \end{aligned}$$

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

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

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

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

$$\ell_0 = m_{np} \cdot r_2 \cdot d_1;$$

$$\ell_1 = V_0 \cdot k_N \cdot m_{np} \cdot r_2 \cdot d_1;$$

$$\ell_2 = -M \cdot d_1;$$

$$\ell_3 = I_N + m_{np} \cdot r_2^2;$$

$$\ell_4 = V_{O_1} \cdot k_N \cdot I_N + V_0 \cdot k_N \cdot m_{np} \cdot r_2^2;$$

$$\ell_5 = -d_2 \cdot M;$$

$$\ell_6 = -V_{O_1} \cdot M. \quad (2)$$

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

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

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 ℓ_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.

$$\begin{aligned}
 & -D_0 \cdot L_5 + D_1 \cdot V_{O_1}^2 \cdot L_4 - D_2 \cdot L_3 - D_2 \cdot L_2 + V_0^2 \cdot D_5 \cdot L_1 - D_1 \cdot V_{O_1}^2 \cdot L_6 + D_2 \cdot L_5 + \\
 & + V_{O_1}^2 \cdot L_4 \cdot D_3 > 0; \\
 & D_2 \cdot L_5 - D_0 \cdot L_5 - D_2 \cdot L_3 - D_2 \cdot L_2 > D_1 \cdot V_{O_1}^2 \cdot L_6 - D_1 \cdot V_{O_1}^2 \cdot L_4 - \\
 & - V_0^2 \cdot D_5 \cdot L_1 - V_{O_1}^2 \cdot L_4 \cdot D_3; \\
 & V_{O_1} < \sqrt{\frac{D_2 \cdot L_5 - D_0 \cdot L_5 - D_2 \cdot L_3 - D_2 \cdot L_2}{D_1 \cdot L_6 - D_1 \cdot L_4 - D_5 \cdot L_1 - L_4 \cdot D_3}}
 \end{aligned} \tag{14}$$

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 очікую 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

масс /А.Н.Леженкин //Механиз.и электриф.технологических процессов АПК /Известия междунар.академии аграрного образования. – С.Пб, 2008. – Вып.6, т.1. – С. 76-84.

10. *Леженкін О.М.* Стійкість руху трактора при агрегуванні причіпного збирального агрегату /О.М.Леженкін //Праці /ТДАТА. – Мелітополь, 2005. – Вип.31. – С.89-102.

11. *Леженкин А.Н.* Анализ устойчивости движения прицепной уборочной машины очесывающего типа /А.Н.Леженкин // Информационные технологии в эксплуатации МТП АПК /Известия междунар. академии аграрного образования. – С.Пб., 2008. – Вып.7, т.1. – С.110-115.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПРИЦЕПА-ТЕЛЕЖКИ ДЛЯ СБОРА ОЧЕСАННОГО ВОРОХА

Леженкин О.М.

Аннотация

В статье приводится методика исследования устойчивости движения прицепа-тележки для сбора очесанного вороха

THE ANALYSIS OF STABILITY OF MOVEMENT OF THE TRAILER-CART FOR GATHERING OF LOTS

O. Lezhenkin.

Summary

In article the technique of research of stability of movement of the trailer-cart for gathering lots is resulted.