УДК 631.362

А.І. Бойко, проф., д-р техн. наук, Л.А. Савченко, здобувач
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

Визначення структури силових факторів, що діють на жниварний машинно-тракторний агрегат з боковою навіскою

В статті розглянуто фактор стійкості руху машино-тракторних агрегатів, від якого залежить якість та експлуатаційні показники виконання технологічних операцій, у тому числі траєкторія та енергоємність МТА. Встановлені геометричні параметри жниварного МТА з боковою навіскою, зв'язки між елементами системи і силові фактори, що діють на них, необхідні для складання рівнянь динаміки руху.
стійкість руху, жниварний МТА, траєкторія, динаміка руху

Стійкість руху відіграє важливу роль в роботі польових МТА призначених для механізації робіт в рослинництві. Від стійкості руху залежить не тільки якість, але в деяких випадках і можливість виконання технологічних операцій. Якщо даже стійкість руху МТА безпосередньо і не вирішує можливість проведення тієї чи іншої операції по догляду за рослинами, то все одно вона відіграє важливу роль в виконанні польових робіт. Так, від стійкості руху залежить траєкторія і енергоємність переміщення МТА. Правомірно допустити, що чим ближче реалізуєма траєкторія наближається до бажаної, тим менший шлях проходить агрегат і тим менші витрати пального і часу необхідно на його переміщення.

Схема жниварного МТА як технічної системи об'єднаної в єдине ціле з прикладеними силами, моментами і геометричними параметрами представлено на рис.1.

Жниварний машинно-тракторний агрегат складається з трактора МТЗ-80, агрегатованого з жниваркою ЖВП-6,4. Трактор має колісну формулу 4К2 з приводом на задні ведучі колеса. Рушійна сила агрегату обумовлена активними силами $P_к$, що діють на привідні задні колеса. Всі колеса жниварного МТА як трактора, так і жниварки мають опір перекочування по полю F_{ci}. У випадках неспівпадання напрямку руху МТА з напрямком сили опору виникають бокові сили $F_{\delta i}$ Вони характерні для передніх керованих коліс трактора і опорних коліс серійної жниварки. Геометричні суми сил опору і бокових сил дають суму сил сил F_i, що діють на вказані колеса.

$$\bar{F} = \bar{F}_{ci} + \bar{F}_{\delta i}. \qquad (1)$$

Результуюча сила направлена в напрямку швидкості руху $\bar{V}_0$ МТА.

Для вивчення динаміки і стійкості руху жниварного МТА доцільно розглянути його в системі нерухомих декартових координат ХОУ. Відповідно до прийнятої системи встановлені координати центрів ваги трактора $X_{ст}$, $Y_{ст}$ і жниварки $X_{сж}$, $Y_{сж}$.

Внаслідок асиметричного навантаження агрегату сумарний його опір зміщується вправо відносно центральної повздовжньої осі трактора. Утворений момент сприяє розвертанню агрегату за годинниковою стрілкою. Для компенсації цього небажаного зміщення і його зрівноваження оператор вимушений розвертати передні керовані колеса на деякий кут α, створюючи тим самим бокові зусилля $F_{\delta п}$, які породжують реактивний момент, направлений проти годинникової стрілки.

Згідно прийнятих на рис.1 позначень умову зрівноваженості дії сил відносно точки зчеплення можна записати слідуючим чином.

$$M_{ж}=M_{т.} \tag{2}$$

Або

$$\sum F_{жсі} \cdot a_i = 2 \cdot F_{\delta m} \cdot l_1 , \tag{3}$$

a_i – плече і-сили діючої на жниварку;

l_1 – міжосьова відстань трактора.

Рух жниварного МТА як динамічної системи обумовлюється дією прикладених сил і характером зв'язків, що об'єднують функціональні частини в єдину технічну систему. Зв'язком для жниварного агрегату є шарнірне зчеплення між трактором і жниваркою. Цей зв'язок носить геометричний голономний характер і обмежує рух жниварки.

Для аналізу динаміки руху жниварного МТА в дослідженні зроблено ряд припущень, що дадуть змогу моделювання процесів без втрати основних закономірностей переміщення агрегату як автономної технічної системи:

– при розгляді руху враховуються тільки основні елементи, які здійснюють свої поступальні та обертальні переміщення;

– усі точки МТА, що здійснюють рух по полю, переміщуються у площинах паралельних площині осей координат XOY;

– рух жниварного МТА починається з моменту часу t_0, якому відповідає швидкість руху $V_0=0$ (стан спокою). В процесі переміщення швидкість руху не міняється, а вважається величиною сталою;

– енергозасіб (трактор) і причіпна жниварка з боковою навіскою представляють собою механічну систему, з'єднану шарнірно, що здійснює плоско-паралельний рух відносно поверхні поля (система координат XOY);

– МТА рухається рівномірно, а профіль поля під колесами однаковий і не суттєво впливає на траєкторію руху. Опорні колеса мають постійний локальний контакт з поверхнею поля;

– опір переміщення МТА є випадковою величиною, що зводиться до функцій часу від сили F_c (t) і моменту M_c (t), які прикладені до центральних осей і центрів мас трактора та жниварки. Усередині загальні сумарні значення опорів вважаються величинами постійними;

– центр мас трактора і жниварки знаходяться на головних повздовжніх осях;

– прийнято, що при переміщенні МТА опір поверхні виникає тільки за рахунок деформації та зминання ґрунту боковими поверхнями опорних коліс. Сила тертя опорних коліс по ґрунту входить складовою в загальний тяговий опір переміщення МТА;

– вплив відцентрових сил і гіроскопічних моментів інерції не враховується внаслідок незначних їх величин.

Відповідно до прийнятних позначень (рис.1) відстань між точками приєднання жниварки до трактора (точка O_2) і центром її маси (точка $C_ж$) дорівнює:

$$l_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}\ . \tag{4}$$

Враховуючи координату цих точок можна записати:

$$(x_{02} - x_{сж})^2 + (y_{02} + y_{сж})^2 = \sqrt{a_2^2 + в_2^2}\ . \tag{5}$$

Отримане рівняння і є рівнянням зв'язку, що обмежує рух жниварки як причіпного агрегату до енергоносія. Координати центру маси жниварки завжди можна виразити через задані a_2, $в_2$ параметри і кут відхилення $\varphi_н$.

$$\begin{cases} x_{сж} = a_2 \cdot \cos\varphi_н + в_2 \cdot \sin\varphi_н; \\ y_{сж} = a_2 \cdot \sin\varphi_н + в_2 \cdot \cos\varphi_н \end{cases}, \tag{6}$$

де, a_2 – відстань між точкою зчеплення і головною віссю жниварки;

$в_2$ - зміщення центра мас жниварки по її головній осі.

Тоді рівняння зв'язку після підстановки представляється слідуючим чином:

$$(x_{02} - a_2 \cdot \cos\varphi_н - в_2 \cdot \sin\varphi_н)^2 + (y_{02} - a_2 \cdot \sin\varphi_н - в_2 \cdot \cos\varphi_н)^2 = \sqrt{a_2^2 + в_2^2}\ . \tag{7}$$

Отримане рівняння зв'язку знижуючи ступінь вільності системи остаточно визначає кількість незалежних узагальнених координат за допомогою яких однозначно може бути описана динаміка руху жниварного МТА з причіпною боковою навіскою. До цих координат належать:

– координати центра мас трактора $X_{ст}$, $Y_{ст}$;

– кут повороту повздовжньої осі трактора навколо центра масс $\beta_{ст}$;

– кут повороту жниварки навколо центра мас $\beta_{сж}$.

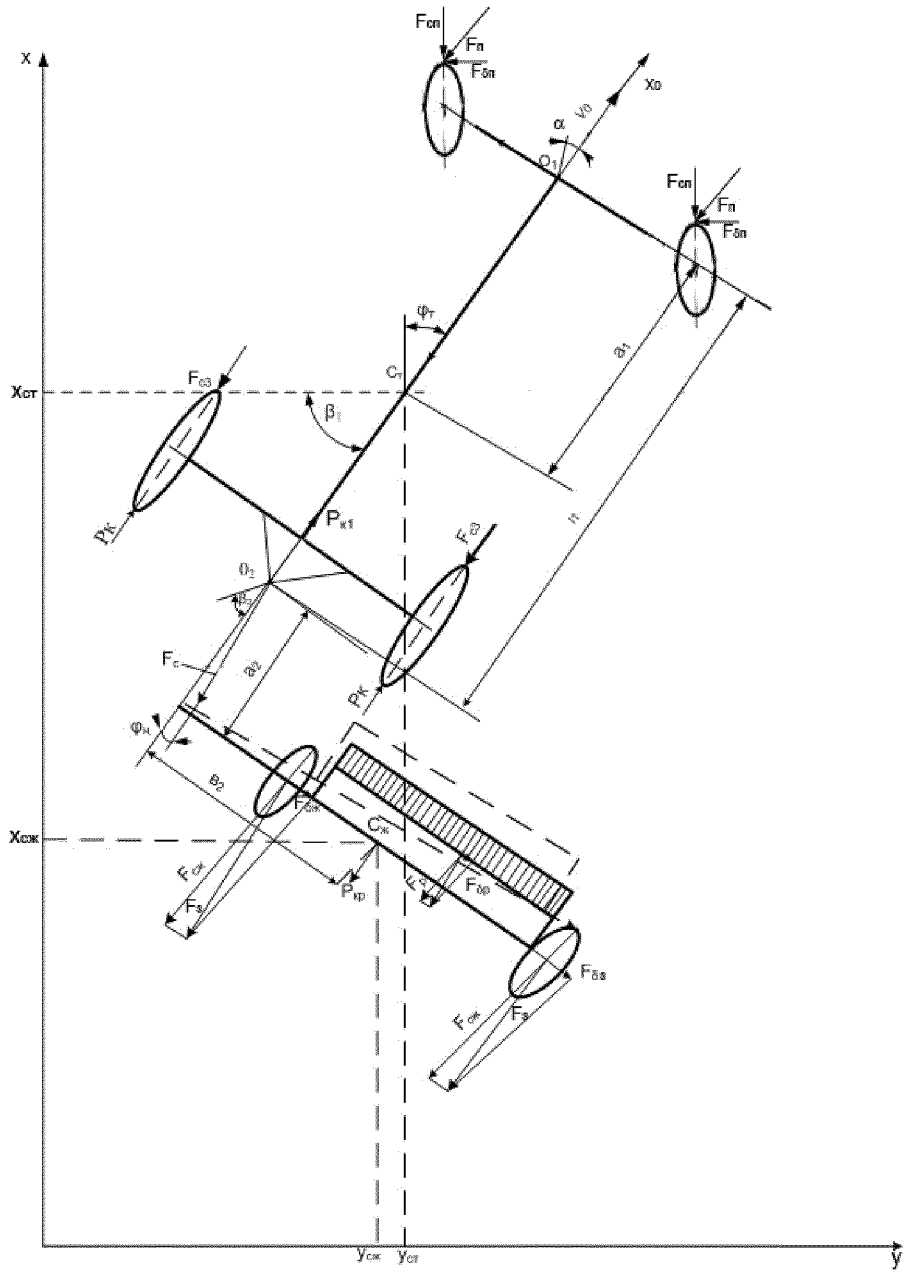

Рисунок 1 - Схема сил, які діють на трактор та жниварку

Згідно прийнятої схеми навіски (рис.1) різниця між кутами поворотів трактора і жниварки визначає їх відносне кутове зміщення $\varphi_н$, яке параметрично присутнє в рівнянні зв'язку.

$$\varphi_н = \beta_{ст} - \beta_{сж}. \tag{8}$$

Дослідження динаміки руху жниварного МТА можливе на основі використання варіаційних принципів механіки. Побудуємо для розглядаємої системи рівняння Лагранжа другого роду.

Загальний вигляд рівняння для жниварного МТА з урахуванням голономності зв'язків представляється у вигляді:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{d\dot{q}_s}\right)-\frac{dT}{d\dot{q}_s}=Q_s, \tag{9}$$

де Т - кінетична енергія системи ;

q_s - узагальнені координати;

S - індекс узагальненої координати;

Q_s - узагальнена сила (момент), що відповідає прийнятій узагальненій координаті.

Кінетична енергія жниварного МТА складається з кінетичної енергії енергоносія (трактора) і кінетичної енергії агрегатованої сільськогосподарської машини (жниварки). В свою чергу, кінетична енергія кожної із складових технічної системи утворюється поступовим і обертовим переміщенням. Тому, в загальному вигляді кінетичну енергію МТА можна записати у вигляді слідуючої суми:

$$T=\sum_{i=1}^{2}T_i=0{,}5\cdot\sum_{i=1}^{2}\left[\ m_i\cdot(\dot{x}_i^{\,2}+\dot{y}_i^{2})+\mathrm{I}_i\omega_i^{\,2})\ \right]. \tag{10}$$

Оскільки розглядається двумасова система, що складається з трактора і жниварки, то виходячи з загального визначення кінетичної енергії (рівняння 10) можна записати.

$$T=\frac{1}{2}\cdot m_m\cdot\left(\dot{x}^{2}{}_{cm}+\dot{y}^{2}{}_{cm}\right)+\frac{1}{2}\cdot\mathrm{I}_m\cdot\omega_m^{\,2}+\frac{1}{2}\cdot m_{ж}\cdot(\dot{x}^{2}{}_{cж}+\dot{y}^{2}{}_{cж})+\frac{1}{2}\cdot\mathrm{I}_{ж}\cdot\omega_{ж}^{\,2}, \tag{11}$$

де $m_т$ – маса трактора;

$x_{ст}$, $y_{ст}$ – координати центра мас трактора;

$I_т$ – момент інерції трактора;

$\omega_{ст}$ – кутова швидкість повороту трактора навколо власного центра мас;

$m_ж$ –маса жниварки;

$x_{сж}$, $y_{сж}$ – координати центра ваги жниварки;

$I_ж$ – момент інерції жниварки;

$\omega_ж$ –кутова швидкість повороту жниварки навколо власного центра мас.

Складові швидкостей $\dot{x}_{cm}, \dot{y}_{cm}, \dot{x}_{cж}, \dot{y}_{cж}$ знаходяться виходячи з геометричних параметрів побудови МТА. За основу відліку прийняті координати $x_{ст}$, $y_{ст}$. Відповідно до них координати центру мас жниварки визначаються рівняннями:

$$\begin{cases} x_{cж}=x_{cm}-(l_1-a_1)\cdot\sin\beta_{cm}-a_2\cdot\sin\beta_{cж}-в_2\cdot\cos\beta_{cж} \\ y_{cж}=y_{cm}-(l_1-a_1)\cdot\cos\beta_{cm}-a_2\cdot\cos\beta_{cж}-в_2\cdot\sin\beta_{cж} \end{cases}; \tag{12}$$

де, a_1 – відстань між передньою віссю трактора і центрами мас трактора.

Швидкість переміщення центра мас жниварки знаходяться диференціюванням системи рівнянь (12) по часу.

$$\begin{cases} \dot{x}_{cж}=\dot{x}_m-(l_1-a_1)\cdot\dot{\beta}_{cm}\cdot\cos\beta_{cm}-a_2\cdot\dot{\beta}_{cж}\cdot\cos\beta_{cж}+в_2\cdot\dot{\beta}_{cж}\cdot\sin\beta_{cж} \\ \dot{y}_{cж}=\dot{y}_{cm}+(l_1-a_1)\cdot\dot{\beta}_{cm}\cdot\sin\beta_{cm}+a_2\cdot\dot{\beta}_{cж}\cdot\sin\beta_{cж}+в_2\cdot\dot{\beta}_{cж}\cdot\cos\beta_{cж} \end{cases}. \tag{13}$$

У відповідність встановленим узагальненим координатам визначимо узагальнені сили. В проекції на вісь х маємо:

$$Q_{xcm} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{2} \delta A \cdot (F_i)\right] \cdot x_{cm}}{\delta \cdot x_{cm}} \tag{14}$$

або

$$Q_{xcm} = \frac{\sum_{i=1}^{2} F_{xi} \cdot \delta x_i}{\delta x_{cm}}. \tag{15}$$

Так як $\delta x_i = \delta x_{ст.}$, то

$$Q_{xcm} = \sum_{i=1}^{2} F_{xi} = F_{xcm} + F_{xжc}.$$

По аналогії узагальнена сила, що діє у напрямку осі, дорівнює сумі

$$Q_{ycm} = \sum_{i=1}^{2} F_{yi} = F_{ycm} + F_{yсж}, \tag{16}$$

де $\sum_{i=1}^{2} F_{xi} i \sum_{i=1}^{2} F_{yi}$ - сума проекцій усіх сил на і ланку системи, що діють відповідно в проекціях на вісь х і вісь у;

$\delta A(F_i)$ – варіації роботи суми сил F_i;

δx, δy – варіації переміщень у напрямку осей х і у.

Узагальнені сили (моменти), що виникають в результаті кутових переміщень трактора $\beta_{ст}$ і жниварки $\beta_{сж}$ можуть бути визначені, як варіації робіт при цих переміщеннях. Для цього визначимо координати шарніра приєднання жниварки до трактора (точки O_2).

З геометричних побудов координати точки O_2 складають:

$$\begin{cases} x_{02} = x_{cm} - (l_1 - a_1) \cdot \sin \beta_1 \\ y_{02} = y_{cm} - (l_1 - a_1) \cdot \cos \beta_1 \end{cases}. \tag{18}$$

Варіації координат точки зчеплення O_2 будуть:

$$\begin{cases} \delta x_{02} = \delta x_{cm} - (l_1 - a_1) \cdot \delta\beta_{cm} \cdot \cos \beta_{cm} \\ \delta y_{02} = \delta y_{cm} + (l_1 - a_1) \cdot \delta\beta_{cm} \cdot \sin \beta_{cm} \end{cases}. \tag{19}$$

Узагальнена сила (момент сили), що діє на трактор в центрі його масс:

$$Q_{\beta cm} = \frac{\left[\sum_{k=1}^{n} \delta A(\mathrm{F_к})\right] \cdot \beta_{cm}}{\delta \cdot \beta_{cm}}. \tag{20}$$

або підставивши складові

$$Q_{\beta cm} = M_{cm} - M_{om} + \frac{1}{\delta\beta_{cm}}\left[F_{xo2} \cdot \delta x_{02} + F_{yo2} \cdot \delta y_{02}\right]. \tag{21}$$

Звідкіля

$$Q_{\beta ст} = M_{ст} - M_{от} + (l_1 - a_1) \cdot \left[F_{хо2} \cdot \sin \beta_{ст} - F_{уо2} \cdot \cos \beta_{ст} \right]. \qquad (22)$$

Відповідно по аналогії для узагальненого кутового переміщення центра мас жниварки запишемо:

$$Q_{\beta с^{ж}} = M_{сж} - M_{ож}. \qquad (23)$$

Встановлені геометричні параметри жниварного МТА з боковою навіскою, зв'язки між елементами системи і силові фактори, що діють на них необхідні для складання рівнянь динаміки руху, що буде проведено в подальших дослідженнях.

Список літератури

1. Авдеев В.М. Устойчивость и управление движением колесного шарнірно - сочлененного трактора по грунту в составе сельськохозяйственного агрегату. Автограф, Харьков. 1985.
2. Аветисян Р.Д. Иследования устойчивости движения и управления культиваторным агрегатом при междурядной обработке пропашных культур на силосах. Автограф. Єреван. 1974.
3. Бартаханов П.Б. Иследования устойчивости движения и управления колесного агрегата в условиях эксплуатации.-М.: Колос, 1965.
4. Бычков Н.И. Обоснование схем агрегатирования машин./ Механизация и електрификация сельского хазяйства.- 1981.- №6.

А. Бойко, Л. Савченко

Определение структуры силовых факторов, которые действуют на жатный машинно-тракторный агрегат с боковой навеской

В статье расмотрен фактор устойчивости движения машино-тракторных агрегатов от которых зависят качественные и эксплуатационные показатели технических операций, в том числе траэктория и энергоемкость МТА. Установлены геометрические параметры жниварного МТА с боковой навеской, связи между элементами системы и силовые факторы, которые действуют на них, необходимые для составления уравнений динамики движения.

A. Boiko, L. Savchenko

The determination of structure of power factors which operating on the harvesting machine-tractor units with side hinge-plate

In this article it is examined the factors steadiness of movement machine-tractor units from which depend the qualities and operating factors technical operations including trajectory and energy intensity of MTU. Installed geometric parameters of harvesting MTU with side hinge-plate, connections between elements of system and forcing factors which acting to them are necessary for the creating equation of dynamics of movement.

Одержано 19.09.09