FRI-8.121-1-AMT&ASVM-14

КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ ДИНАМИКАТА НА МОТОКУЛТИВАТОР АГРЕГАТИРАН С ПЛУГ

доц. д-р инж. Радко Михайлов
Добруджански технологичен колеж гр. Добрич част от структурата на
Технически университет гр. Варна, България
Моб. тел.: 0899 904 980
E-mail: rmihajlow@tu-varna.bg

гл. ас. д-р инж. Владимир Демирев
Добруджански технологичен колеж гр. Добрич част от структурата на
Технически университет гр. Варна, България
Моб. тел: 0894 651 789
E-mail: vl.demirev@abv.bg

Резюме: *Обект на изследване е мотокултиватор чиято конструкция е предназначена за почвообработка в лично стопанство с неголеми размери. Идентифицирани са величините – променливи и константни, които характеризират статиката и динамиката при работа на мотокултиватора. Изведени са уравненията на движение, на база съответни опростявания за тяло, което се движи във вертикално-надлъжната равнина с две степени на свобода. Съставен е компютърно симулационен модел на динамичната система с помощта на програмния продукт Vensim. Получено е числено решение. След направения анализ, на модела са направени съответните изводи за подобряване устойчивостта на движението на мотокултиватора в рамките на необходимата управляемост.*

Ключови думи: *мотокултиватор, модел, динамика, устойчивост, управляемост,.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Проблемът за динамичната устойчивост на движението на почвообработващите земеделски машини е от изключителна важност и е обект на внимание от страна на много изследователи (Bozhkov, S., at all 2011), (Даскалов, А., 1989) и др. В тези литературни източници се разглеждат различни класове четириколесни трактори, които имат производствено икономическо предназначение. В статиите на (Овсянников, С., & Гриб В., 2016) и (Овсянников, С., 2015) са определени основните масово-геометрични характиристики на мотокултиватор и са анализирани възникващите сили при работата му. Направен е изводът, че добавянето на опорно около е полезно решение за осигуряване устойчивост на работата на мотокултиватора. Динамичното състояние на мотокултиваторът се определя от баланса на силите, които са приложени върху него в процеса на работа. На лице са примери заснети на клипове в Интернет от които се вижда, че при определени условия този баланс, така може да се установи, че мотокултиваторът да се движи, създавайки бразда, без никаква външна намеса на оператора, но наблюдение от негова страна, естествено е задължително, тъй като и най-малката промяна в условията на работа води до нарушаване на установения баланс на силите.

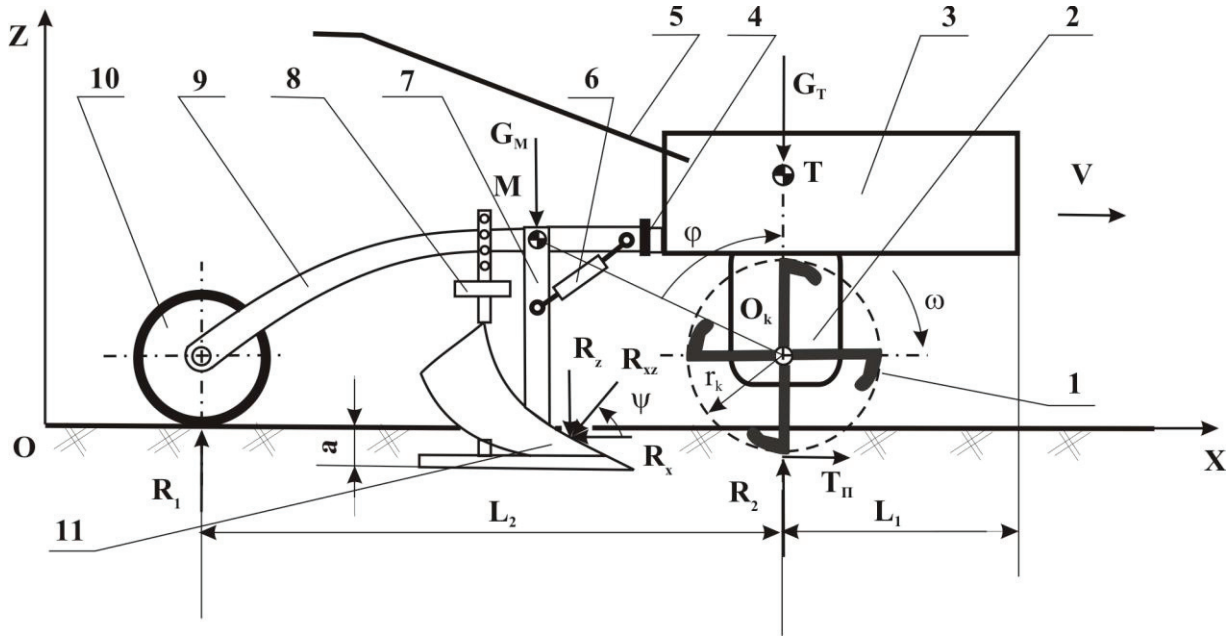
Обект на изследване в настоящата статия е устойчивостта на движението на мотокултиватор със задача да се формулират препоръки и да се въведат съответни подобрения в конструкцията му, за да се облекчи труда на човека, който работи с него.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Изчислителна схема и определяне на променливите и константните параметри на мотокултиваторът

Изследва се мотокултиватор, чийто схематично представяне е показано на фигура 1. Към оригиналната конструкция е добавено опорно колело поз.9. Монтирани са и два силови сензор поз.6 и 8, с които са измерени силите, възникващи във вертикално надлъжната равнина, когато мотокултиваторът работи. Движението по направление на ос **X** се осъществява от

работното колело поз.1. Поддържането на праволинейно движение в хоризонталната равнина става от оператора с ръчките поз.5.



Фиг.1. Изчислителна схема на мотокултиватора.

В статично положение върху мотокултиватора са приложени силите на тежестта от двигателния блок поз. 1, 2 и 3 и от прикачения плуг поз. 11 с опорно колело поз.10, рамо поз.9 и стълбец поз.7. Това са силите: $\mathbf{G_M}$, $\mathbf{G_T}$, $\mathbf{R_1}$ и $\mathbf{R_2}$, (фиг.1). Тези сили и линейните размери показани на фигурата са постоянните величини, характеризиращи мотокултиватора. В динамичен режим при потънал в почвата плуг на дълбочина **a=20 см**, когато мотокултиваторът се движи със корост **V= 0,6 m/s,** възниква разпределен по повърхността на плуга натиск, който може да се представи като съсредоточена сила $\mathbf{R_{xz}}$, в резултат от съприкосновението с почвата. Тази сила сключва ъгъл $\boldsymbol{\psi=12^0}$ по литературни данни (Демирев & Братоев, 2012) с ос **X** и може да се разложи на две компоненти: $\mathbf{R_z}$ и $\mathbf{R_x}$, които се регистрират от силовите сензори поз. 6 и 8. Възниква и силата $\mathbf{T_П}$, причиняваща съпротивителен момент от съприкосновението на двигателното колело с почвата. Скоростта на движението на мотокултиватора и големините на тези сили са променливи във времето според условията на работа.

Уравнения на движение на мотокултиватора

Допускаме, че обектът на изследване се състои от две съсредоточени точкови маси в точка **M** и в точка **T**. На лице са две степени на свобода. Мотоблокът поз.1, 2 и 3 извършва праволинейно транслационно движение по направление на ос **X**, а прикачения инвентар позиции от 6 до 10 - въртеливо движение на ъгъл **φ** около точка $\mathbf{O_к}$ и ос **Y**, която не е показна на схемата, дадена на Фигура 1. Движението се извършва във вертикално-надлъжната равнина, определена от координатната система **OZX** с начало точка **O**. Приема се, че моделът е тип елиптично махало (Писарев, А. и др. 1975).

Обобщените координати $\mathbf{q_{1,2}}$ на модела са декартовите координати **x** и **z**, а ефектът от завъртането на точка **M** на ъгъл **φ** може да се изрази така

$$\varphi \rightarrow \left| \begin{array}{l} x_\varphi = \overline{\mathrm{O_к M}}\, sin\, \varphi \\ z_\varphi = \overline{O_k M} cos\varphi \end{array} \right. \qquad (1)$$

Тогава за обобщените координати $\mathbf{q_{1,2}}$ на точковата маса **M** имаме

$$q_{1,2} \rightarrow \left| \begin{array}{l} x_M = x(t) + \overline{O_k M}\ \sin\varphi(t) \\ z_M = \overline{O_k M} \cos\varphi\,(t) \end{array} \right. \qquad (2)$$

Общата кинетична енергия от постъпателното и въртеливото движение на модела е

$$\mathrm{T} = \mathrm{T_T} + \mathrm{T_M} \qquad (3)$$

където $\mathbf{T_T}$ е кинетична енергия на двигателния блок, а $\mathbf{T_M}$ е кинетична енергия на работната машина. Те имат следния вид:

$$\mathrm{T_T} = \frac{m_T \dot{x}^2}{2} \qquad \mathrm{T}_M = \frac{m_M(\dot{x}_M^2 + \dot{z}_M^2)}{2} \tag{4}$$

След диференциране на $\boldsymbol{x_M}$ и $\boldsymbol{z_M}$, виж ф. (2) и извършване на привеждане за $\mathbf{T_M}$ се получава

$$T_M = \frac{m_M}{2}(\dot{x}^2 + 2\overline{O_kM}\dot{x}\dot{\varphi}\cos\varphi + \overline{O_kM}^2\dot{\varphi}^2\cos^2\varphi + \overline{O_kM}^2\dot{\varphi}^2\sin^2)\,\varphi \tag{5}$$

Общата кинетична енергия на модела е

$$\mathrm{T} = \frac{1}{2}(m_T + m_M)\dot{x}^2 + m_M\overline{O_kM}\dot{x}\dot{\varphi}\cos\varphi + \frac{1}{2}m_M\overline{O_kM}^2\dot{\varphi}^2 \tag{6}$$

Потенциалната енергия на тялото със съсредоточената маса $\boldsymbol{m_M}$ е

$$\Pi = -m_M g(\overline{O_kM}\cos\varphi + r_k) \tag{7}$$

където $\boldsymbol{g}$ е земното ускорение, а $\mathbf{r_k}$ е радиус на двигателното колело.

Функцията на Лагранж за системата от двете тела е

$$L = \mathrm{T} - \Pi = \frac{1}{2}(m_T + m_M)\dot{x}^2 + m_M\overline{O_kM}\dot{x}\dot{\varphi}\cos\varphi + \frac{1}{2}m_M\overline{O_kM}^2\dot{\varphi}^2 + m_M g(\overline{O_kM}\cos\varphi + r_k) \tag{8}$$

Движението се изразява с две уравнения на Лагранж от вида

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} = Q_x \quad \text{и} \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = Q_z \tag{9}$$

Обобщените активни сили по съответните степени на свобода са:

- по ос X: $Q_x = T_\Pi - R_x$ (10)

където силата от триенето на двигателното колело с почвата е: $\mathrm{T}_\Pi = \mu R_2$, (Фиг. 1.);

- и по ос Z: $Q_z = -R_z - G_T - G_M$ (11)

Системата уравнения за движение придобива вида

$$(m_T + m_M)\ddot{x} + m_M\overline{O_kM}\ddot{\varphi}\cos\varphi - m_M\overline{O_kM}\dot{\varphi}\sin\varphi = T_\Pi - R_x \tag{12}$$

$$m_M\overline{O_kM}\ddot{x}\cos\varphi + m_M\overline{O_kM}\ddot{\varphi} + g m_M\overline{O_kM}\sin\varphi = -G_M - G_T - R_z \tag{13}$$

С цел за опростяване на изразите полагам: $D = m_M\overline{O_kM}$. И тъй като ъгъл $\boldsymbol{\varphi}$ се изменя в много тесни граници то може да се приеме, че $\sin\varphi \cong \varphi$ и $\cos\varphi \cong 1$, тогава системата става

$$(m_T + m_M)\ddot{x} + D\ddot{\varphi} - D\dot{\varphi}\varphi = T_\Pi - R_x \tag{14}$$

$$D\ddot{x} + D\ddot{\varphi} + gD\varphi = -G_M - G_T - R_z \tag{15}$$

Системата уравнения представена в матричен вид е

$$\begin{vmatrix} m_T + m_M & D \\ D & D \end{vmatrix}\begin{Vmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\varphi} \end{Vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & D\varphi \\ 0 & 0 \end{vmatrix}\begin{Vmatrix} \dot{x} \\ \dot{\varphi} \end{Vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ gD \end{vmatrix}\begin{Vmatrix} x \\ \varphi \end{Vmatrix} = \begin{vmatrix} T_\Pi - R_x \\ -G_M - G_T - R_z \end{vmatrix} \tag{16}$$

Съкратеният запис е

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Fq = C \tag{17}$$

Матрицата **A** има обратна, защото съдържа положителни и постоянни величини. Матричното уравнение (17) може да се представи като линейно диференциапно уравнение от втори ред

$$\ddot{q} = -A^{-1}B - A^{-1}F + A^{-1}C \tag{18}$$

Компютърна симулация на движението на мотокултиватора. Числено решение

Заместваме със стойностите на величините, които участват в уравнения (17) и след преобразувания се стига до следния вид на системата диференциални уравнения

$$\begin{vmatrix} a\ddot{x} + d\ddot{\varphi} - d\varphi\dot{\varphi} = b \\ d\ddot{x} + d\ddot{\varphi} + f\varphi = c \end{vmatrix} \tag{19}$$

където **a = 4,1; b = 12,5; c = 46,18; d = 30,6; f = 300.**

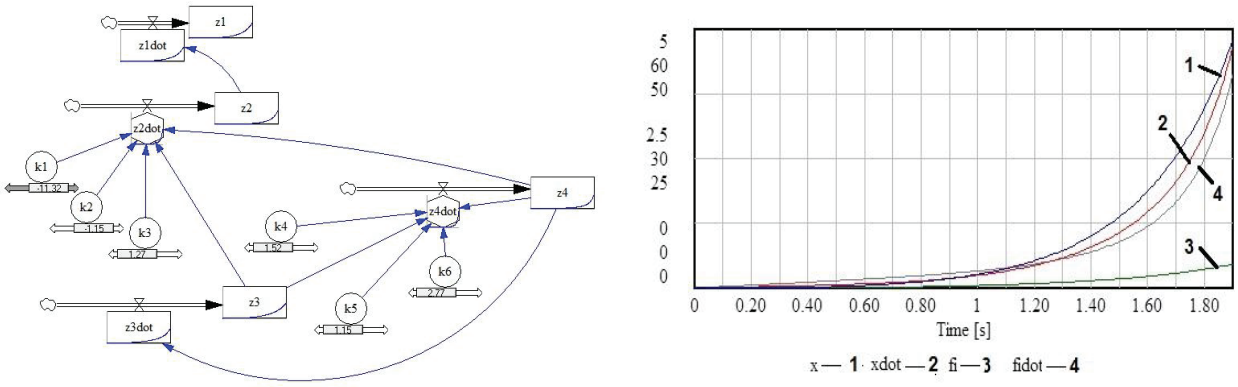
Получената система (19) от четвърти ред се привежда към система от четири диференциални уравнения от първи ред чрез следната смяна на променливите

$$x = z_1;\ \dot{x} = z_2;\ \varphi = z_3;\ \dot{\varphi} = z_4 \tag{20}$$

и придобива следния вид

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = \dfrac{f}{a-d} z_3 + \dfrac{d}{a-d} z_3 z_4 - \dfrac{c-b}{a-d} \\ \dot{z}_3 = z_4 \\ \dot{z}_4 = -(\dfrac{f}{a-d} + \dfrac{f}{d}) z_3 - \dfrac{d}{a-d} z_3 z_4 + \dfrac{c-b}{a-d} + \dfrac{c}{d} \end{cases} \tag{21}$$

Съставен е симулационен модел, (Фиг. 2.) чрез използване символиката на програмния продукт Vensim, който представлява симулатор за графично меделиране и симулация на динамични системи описани чрез обикновени диференциални уравнения, (Митрев, Р., 2016).



а) б)

Фиг.2. Графичен модел а) и резултати от симулацията б).

Анализ за устойчивост на линейната система

Системата диференциални уравнения на движението (19) е линейна, което означава, че собствените стойности на матрицата **A** изцяло определят устойчивостта на равновесната точка и вида на фазовият портрет. В случая решенията на характеристичното й уравнение са

$$\lambda_1 = 34{,}7 + 44{,}3\,j \quad \text{и} \quad \lambda_2 = 34{,}7 - 44{,}3\,j \tag{22}$$

две комплексно спрегнати числа с положителна реална част, което означава, че фазовите траектории представляват семейство логаритмични спирали, който се отдалечават от равновесната точка, т.е. имаме неустойчив фокус.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамичното моделиране на мотокултиватора показа, че той е неустойчива система, която изисква да бъде непрекъснато регулирана с външно въздействие, за да може да функционира според предназначението си, а именно да прокарва праволинейна бразда в почвата.

Въвеждането на опорно колело не решава окончателно въпроса с устойчивостта. Необходими са и допълнителни мерки, които се изразяват, според резултатите от изследването, в промяна стойностите на параметрите в матрицата **A**. Когато реалната част на корените ф. (22) стане отрицателна, фазовите траектории стават семейство логаритмични спирали, които се приближават към равновесната точка, наречена устойчив фокус. А ако собствените стойности на матрицата **A** са чисто имагинерни числа, то в този случай фазовите траектории ще са вложени една в друга елипси (или в частен случай окръжности), включващи равновесната точка, която е неутрално устойчива и се нарича център.

Това може да се постигне чрез промяна стойностите на елементите на матрицата **A**, които представляват масите на двете тела, участващи в динамичния модел. С други думи, не-

обходимо е да се въведат разумни промени в конструкцията на мотоблока чрез промяна на някой размери и материалите от които са изработени детайлите му.

REFERENCES

Bozhkov, S., Badrikov E., Yankova V., Stefanov K., & Mihov M., (2011). R*esearch on stability and designing of protective structure of transport vehicle for small farms, INMATEH - Agricultural Engineering, Vol. 35, No.3 / 2011, 41-48.;*

Даскалов, А., (1989). *Динамична устойчивост на тракторите срещу прекатурване*, Земиздат, София, 237 стр.;

Демирев, Ж., Братоев, Кр., (2012). *Земеделски машини I*, РУ Русе „А. Кънчев“, 171 стр.;

Леженкин, А., Рубцов Н., & Грогоренко С., (2012), *Опредление сроросги движения уборочного агрегата с переменной массой*, Праці ТДАТУ, Вип. 13. Т.3, 79-85;

Митрев, Р., (2016). *Компютърно моделиране и симулация. Моделиране на непрекъснати динамични системи*., Изд. Пропелер, 197 стр.;

Овсянников, С., & Гриб В., (2016). *Определение основнъих массово-геометрических параметров мотоагрегатов,* 406-412;

Овсянников, С., (2015). *Особености расчета пахотного мотоагрегата*, 21-29

Писарев, А. Парасков Ц., & Бъчваров С., (1975). *Курс по теоретична механика II част. Динамика*, ДИ „Техника“, София.