



УДК.629.017: 631.31.06

## **КЕРОВАНІСТЬ І СТІЙКІСТЬ РУХУ ГРУНТООБРОБНИХ МОБІЛЬНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТІВ МОДЕЛЮВАННЯМ ПАРЦІАЛЬНИХ ПРИСКОРЕНЬ**

Артёмов М.П., д.т.н.

*Харківський національний технічний університет сільського  
господарства ім. П.Василенка*

*Тел. (057) 700-38-93*

**Анотація** – в роботі запропонована методика визначення кутів відхилення трактора і сільськогосподарських машин в процесі роботи ґрунтообробних мобільних сільськогосподарських агрегатів та їх вплив на виконання агротехнічних операцій. Використання сучасних приладів і методів розрахунку дає можливість обирати оптимальні рішення для розрахунку і комплектування мобільних сільськогосподарських агрегатів, а так само скоротити експлуатаційні витрати.

**Ключові слова** – машинно-тракторний агрегат, динамічні параметри, керованість, парціальні прискорення.

*Постановка проблеми.* Розвиток елементної бази на сучасному етапі розширив можливості визначення енергетичних показників сільськогосподарських агрегатів і дають можливість їх контролювати при виконанні ними технологічних операцій та контролю динамічних процесів, що відбуваються в механічній системі «трактор – сільськогосподарська машина». Що дає можливість удосконалювати існуючі розрахунково-експериментальні методи проведення тягових випробувань.

Керованість об'єкта відображає його здатність адекватно реагувати на будь який керуючий вплив. Мобільний сільськогосподарський агрегат (МСА), як механічна система, постійно перебуває під дією різного роду збурень, що сприяють відхиленню його від прямолінійної траєкторії руху.

Керуючі впливи сприяють переходу цієї системи від одного стану рівноваги до іншого. При цьому змінюються вихідні параметри системи. В процесі виконання агротехнічних операцій при постійній зміні зовнішніх навантажень, керування ґрунтообробним агрегатом



для забезпечення його динамічної і функціональної стабільності, ефективного використання, є однією з проблем їх експлуатації.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Проведений аналіз вітчизняних і зарубіжних літературних джерел показує, що технологічні і техніко-економічні показники МСА, за більшістю параметрів, залежать від керованості і стійкості їх руху.

На початковому етапі експлуатації сільськогосподарська техніка рухалася з невеликими поступальними і кутовими швидкостями, питання про стійкість і керованість МСА мало обговорювалося серед вчених [1, 2]. Із збільшенням швидкостей та енергонасиченості сільськогосподарських агрегатів перед дослідниками постала проблема визначення впливу сил і моментів на динамічні параметри МСА, а також забезпечують стійкість і керованість його руху. При дослідженні руху МСА, що виконує агротехнічні операції, його можна уявити як багатоланцюгову механічну систему, на яку діють зовнішні силові фактори [3, 4, 5, 6, 7]. Особливу увагу необхідно звернути на метод [8] який ґрунтується на використанні експериментально виміряних парціальних прискорень і є еквівалентною заміною існуючих методів проведення динамічних випробувань мобільних сільськогосподарських агрегатів та одиничних тракторів.

*Постановка задачі дослідження.* На ґрунтообробний агрегат в процесі виконання агротехнічних операцій діють стохастичні зміни зовнішні навантаження, що утруднює його керування. Однією з проблем експлуатації, ефективного використання, є забезпечення його керованості, динамічної і функціональної стабільності.

Основною метою дослідження є підвищення точності визначення параметрів динаміки керованості без втручання в конструкцію мобільного сільськогосподарського агрегату.

Для досягнення поставленої мети необхідно використовувати сучасні прилади і нові розроблені методи.

*Основна частина.* В залежності від мети дослідження важливо використовувати різні розрахункові схеми, що відрізняються точністю представлення в них складових машини та взаємодією між ними. Окрім того кожна схема повинна відповідати процесам, що розглядаються, відображати основні властивості конструкції та забезпечувати відповідність необхідної точності результатів розрахунків та експериментальних випробувань.

Під дією зовнішніх збурюючих сил та зміні технічного стану машини і системи керування трактор разом з сільськогосподарськими знаряддями рухається по траєкторії близькій до синусоїди. Тобто рух агрегату не прямолінійний, а хвилеподібний. Динамічні властивості при різних видах маневрування проявляються через керованість і стійкість руху агрегату. Тому необхідно проводити дослідження та

надати оцінку потенційних динамічних можливостей сільськогосподарських мобільних енергетичних засобів.

Керованість будь-якого МСА характеризують його здатність адекватно реагувати на дії механізатора. Керуючий вплив викликає перехідний процес з одного стану рівноваги МСА, як об'єкту управління, в інше. Для механічних систем, до яких відносяться мобільні машини, перехідний процес супроводжується зміною швидкісного режиму руху. Виникаючі при цьому прискорення характеризують не тільки керованість системи, але й зміну його технічного стану, обумовлене нестабільністю параметрів.

Принципи та умови комплектування МТА, які складають різні системи машин, залежать від конструктивних параметрів і динамічних властивостей машин, що входять до складу агрегату [2].

При проведенні динамічних випробувань скористаємось ґрунтообробним агрегатом МТЗ-80+КПС-4 рис. 1. Проводити контроль параметрів будемо за допомогою вимірювально-реєстраційного комплексу, який обладнано трьохкомпонентними датчиками-акселерометрами. Щоб забезпечити якісний процес контролю динаміки керованості агрегату необхідно встановити таку кількість датчиків, яка дасть змогу контролювати усі напрямки осей ступенів вільності мобільного агрегату.

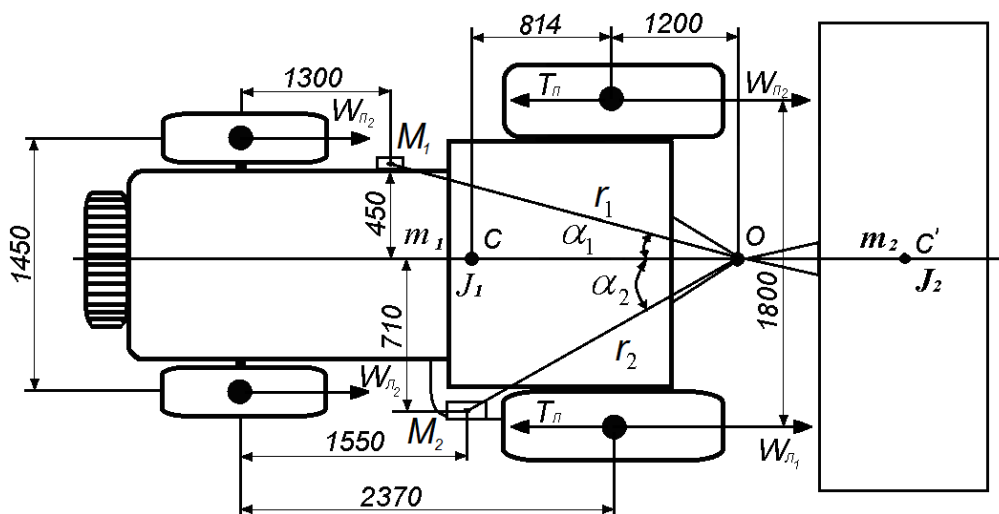


Рис.1. Загальний вигляд ґрунтообробного агрегату МТЗ-80+КПС-4

У загальному випадку рівняння руху ґрунтообробного агрегату будуть нелінійними, і це значно ускладнює завдання контролю над впливом керуючих дій для забезпечення якості виконання агротехнічних операцій.



Після підстановки у рівняння (1) статичних і кінематичних параметрів агрегату отримуємо наступну нелінійну систему звичайних диференціальних рівнянь, які моделюють процес руху МСА:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{\xi} - m_1 b_1 \cos \psi_1 \dot{\psi}_1^2 - m_1 b_1 \sin \psi_1 \ddot{\psi}_1 - m_2 b_2 \cos \psi_2 \dot{\psi}_2^2 - m_2 b_2 \sin \psi_2 \ddot{\psi}_2 =, \\ = (T_{II} + T_{JI} - W_{II} - W_{JI}) \cos \psi_1 - R_x \cos \psi_2 + R_y \sin \psi_2 \\ \\ m\ddot{\eta} - m_1 b_1 \sin \psi_1 \dot{\psi}_1^2 + m_1 b_1 \cos \psi_1 \ddot{\psi}_1 - m_2 b_2 \sin \psi_2 \dot{\psi}_2^2 + \\ + m_2 b_2 \cos \psi_2 \ddot{\psi}_2 = (T_{II} + T_{JI} - W_{II} - W_{JI}) \sin \psi_1 - R_x \sin \psi_2 - R_y \cos \psi_2 \\ \\ - m_1 \ddot{\xi} b_1 \sin \psi_1 + \dot{\eta} b_1 m_1 \cos \psi_1 - \dot{\xi} b_1 m_1 \cos \psi_1 \dot{\psi}_1 - \dot{\eta} b_1 m_1 \sin \psi_1 \dot{\psi}_1 + \\ + 2J_1 \dot{\psi}_1 + C(\psi_1 - \psi_2) = (T_{II} + T_{JI} - W_{II} - W_{JI}) \frac{B_T}{2} \\ \\ - m_2 \ddot{\xi} b_2 \sin \psi_2 + \dot{\eta} b_2 m_2 \cos \psi_2 - \dot{\xi} b_2 m_2 \cos \psi_2 \dot{\psi}_2 - \dot{\eta} b_2 m_2 \sin \psi_2 \dot{\psi}_2 + \\ + 2J_2 \dot{\psi}_2 - C(\psi_1 - \psi_2) = R_y l \cos \psi_2 - R_x l \sin \psi_2 \end{array} \right. ; \quad (1)$$

Припустимо, що відомі прискорення в двох контрольних точках  $M_1$  і  $M_2$  трактора є функціями часу на інтервалі  $(0, t_0)$ . Такі вхідні дані можуть бути отримані в результаті експериментальних вимірювань.

Позначимо компоненти прискорень в цих точках наступним чином: точка  $M_1$  –  $a_{x1}, a_{y1}$ , точка  $M_2$  –  $a_{x2}, a_{y2}$ . Ці компоненти вимірюються відносно нерухомої системи координат, в якій розглядається рух МСА. Потрібно з цими вхідними даними за допомогою системи рівнянь (1), що моделює рух МСА, визначити кути відхилення трактора  $\psi_1$  і ґрунтообробного знаряддя від прямолінійної траєкторії при нормальному тиску в колесах та відхилення  $\psi_2$  із зниженим тиском, як функції часу.

Але перед цим за допомогою вимірювально-реєстраційного комплексу проведемо контроль зміни прискорень агрегату та побудуємо відповідні графіки при роботі з нормальним тиском у ведучих колесах і з пониженим тиском рис.2.

Складена система рівнянь (1) є суттєво нелінійною, у цьому випадку можливе тільки числове її вирішення за допомогою комп'ютера. У конкретному випадку система рівнянь (1) була вирішена відносно другої похідної узагальнених координат  $\ddot{\xi}, \ddot{\eta}, \ddot{\psi}_1, \ddot{\psi}_2$  та перетворена у систему диференціальних рівнянь першого порядку. Для вирішення складеної системи рівнянь скористаємось методом Рунге-Кутта з автоматичним вибором кроку розрахунку.

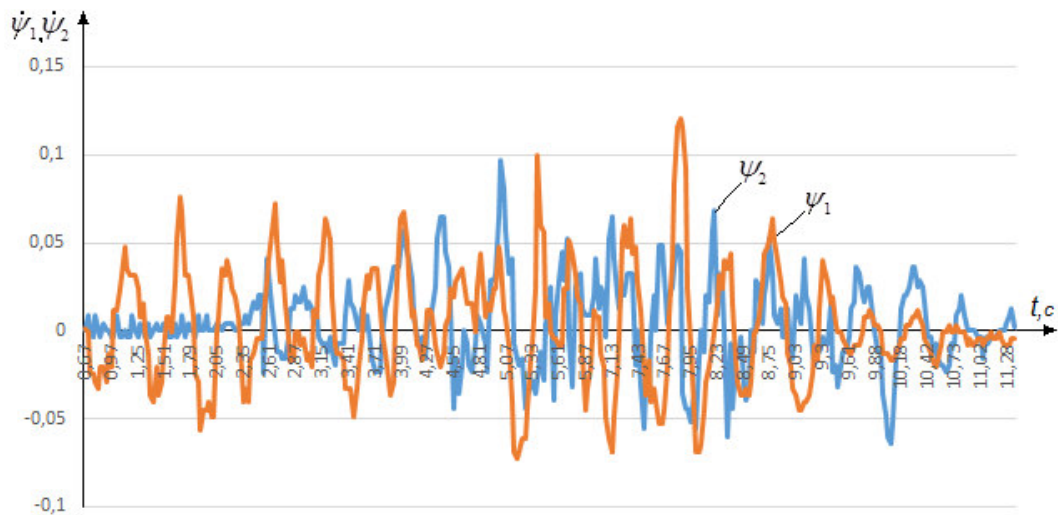


Рис.2. Графік динаміки кутових прискорень ґрунтообробного агрегату МТЗ-80+КПС-4  $\psi_1$  – з шинами нормального тиску;  $\psi_2$  – з приспущеними шинами.

На початку застосування метода парціальних прикорень необхідно провести лінеаризацію системи рівнянь (1). У відповідності до проведених припущень [9], будемо вважати, що сили тяги на ведучих колесах трактора рівні між собою та сили опору коченню коліс теж рівні. Після проведеної лінеаризації початкова система рівнянь (1) прийме вигляд

$$\begin{cases} m\ddot{\xi} = T - W_1 - W_2 - R_x + R_y\psi_2; \\ m\ddot{\eta} + m_1b_1\ddot{\psi}_1 + m_2b_2\ddot{\psi}_2 = (T - W_1 - W_2)\psi_1 - R_x\psi_2 - R_y; \\ m_1b_1\ddot{\eta} + 2J_1\ddot{\psi}_1 + C(\psi_1 - \psi_2) = 0; \\ m_2b_2\ddot{\eta} + 2J_2\ddot{\psi}_2 - C(\psi_1 - \psi_2) = R_y l - R_x l\psi_2; \end{cases} \quad (2)$$

де

$$T_{II} = T_{II} = 0,5T,$$

$$W_{II1} = W_{II1} = W_1,$$

$$W_{II2} = W_{II2} = W_2,$$

$$T_{\Sigma T} = T_{II} + T_{II} - W_{II1} - W_{II2} - W_{II1} - W_{II2},$$

$$T_{\Sigma C} = T_{II} - T_{II} - W_{II1} - W_{II2} + W_{II1} + W_{II2}$$

Проведемо перетворення системи рівнянь (2), скориставшись методом Гауса.



Вирішення модифікованої першої задачі динаміки зводиться до дослідження наступних двох завдань. Перше завдання полягає у визначенні зв'язку між вимірними компонентами прискорень

$$\vec{a}_1 = a_{x1} \vec{e}_x + a_{y1} \vec{e}_y,$$

$$\vec{a}_2 = a_{x2} \vec{e}_x + a_{y2} \vec{e}_y,$$

і узагальненими координатами

$$q_1(t) = \xi(t),$$

$$q_2(t) = \eta(t),$$

$$q_3(t) = \psi_1(t),$$

$$q_4(t) = \psi_2(t).$$

Для такого випадку прискорення будь-якої точки  $M$  тіла можливо представити у вигляді геометричної суми трьох прискорень [10]

$$\vec{a}_M = \vec{a}_o + \vec{a}_b + \vec{a}_c, \quad (3)$$

де  $\vec{a}_o$  – прискорення в точці  $O$ ,

$\vec{a}_b$  – обертальне прискорення,

$\vec{a}_c$  – доцентрове прискорення.

Легко бачити, що прискорення  $\vec{a}_o$  має компоненти,  $a_x^o = \ddot{\xi}$ ,  $a_y^o = \ddot{\eta}$ . Доцентрове прискорення направлено вздовж прямої, що сполучає точки  $M$  і  $O$ , а його величина дорівнює

$$a_c = r \dot{\psi}_1^2,$$

де  $r$  – відстань між точками встановлення датчиків  $M$  і точкою  $O$ , з'єднання трактора і ґрунтообробного знаряддя.

Обертальне прискорення  $\vec{a}_b$  спрямоване вздовж прямої перпендикулярної до прямої, що поєднує точки  $M$  і  $O$  та має величину

$$a_b = r \ddot{\psi}_1.$$



Таким чином, на підставі вище викладеного отримуємо наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} a_{x1} = \ddot{\xi} - r_1 \ddot{\psi}_1 \sin(\psi_1 + \alpha_1) - r_1 \dot{\psi}_1^2 \cos(\psi_1 + \alpha_1), \\ a_{y1} = \ddot{\eta} + r_1 \ddot{\psi}_1 \cos(\psi_1 + \alpha_1) - r_1 \dot{\psi}_1^2 \sin(\psi_1 + \alpha_1), \\ a_{x2} = \ddot{\xi} - r_2 \ddot{\psi}_1 \sin(\psi_1 - \alpha_2) - r_2 \dot{\psi}_1^2 \cos(\psi_1 - \alpha_2), \\ a_{y2} = \ddot{\eta} + r_2 \ddot{\psi}_1 \cos(\psi_1 - \alpha_2) - r_2 \dot{\psi}_1^2 \sin(\psi_1 - \alpha_2). \end{cases} \quad (4)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – кути між прямими, що проходять через точки  $M_1$  і  $O$  та  $M_2$  і  $O$  і поздовжньою віссю трактора, що проходить через точку  $O$  (рис.1).

Припускаємо, що кут повороту  $\psi_1$  достатньо малий. У цьому випадку система рівнянь (4) спрощується і після ряду перетворень можуть бути представлені в наступному вигляді

$$\begin{cases} \Delta a_x = -\Delta_2 \ddot{\psi}_1 + \Delta_1 \dot{\psi}_1^2, \\ \Delta a_y = -\Delta_1 \ddot{\psi}_1 - \Delta_2 \dot{\psi}_1^2, \end{cases} \quad (5)$$

де введено позначення

$$\begin{aligned} \Delta a_x &= a_{x1} - a_{x2}, & \Delta a_y &= a_{y1} - a_{y2}, \\ \Delta_1 &= r_2 \cos \alpha_2 - r_1 \cos \alpha_1, & \Delta_2 &= r_2 \sin \alpha_2 + r_1 \sin \alpha_1. \end{aligned} \quad (6)$$

При вирішенні рівняння ми припускаємо, що  $\sin \psi_1 \cong \psi_1$  і  $\cos \psi_2 \cong 1$ .

Після вирішення рівняння (5) відносно  $\ddot{\psi}_1$  й  $\dot{\psi}_1^2$ , отримаємо:

$$\begin{aligned} \ddot{\psi}_1 &= -\frac{\Delta_2 \Delta a_x + \Delta_1 \Delta a_y}{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}, \\ \dot{\psi}_1^2 &= \frac{\Delta_1 \Delta a_x - \Delta_2 \Delta a_y}{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Після підстановки і перетворень вираз (5) запишемо у вигляді:

$$\ddot{\psi}_1 = -\Delta a_x D_3 - \Delta a_y D_4, \quad (8)$$



де

$$D_3 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2 + (\bar{y}_1 - \bar{y}_2)^2}, \quad (9)$$

$$D_4 = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2 + (\bar{y}_1 - \bar{y}_2)^2}. \quad (10)$$

Значення кута повороту трактора  $\psi_1$  може бути отримано з (8) дворазовим інтегруванням за часом, а саме

$$\psi_1(t) = - \int_0^t dt \int_0^t (\Delta a_x D_3 + \Delta a_y D_4) dt. \quad (11)$$

Невідомими величинами в системі рівнянь (2) є силові характеристики  $T_{\Sigma T}$ ,  $T_{\Sigma C}$ ,  $R_x$ ,  $R_y$  і кут повороту знаряддя  $\psi_2$ .

У цих позначеннях система рівнянь (2) з урахуванням значень узагальнених координат набуває вигляду

$$\begin{cases} A_1 = T_{\Sigma T} + R_x (1 - \psi_2 \gamma) = 0, \\ A_2 + m_2 b_2 \ddot{\psi}_2 - \psi_1 T_{\Sigma T} - R_x (\psi_2 + \gamma) = 0, \\ A_3 - C \psi_2 - T_{\Sigma C} \frac{B_T}{2} = 0, \\ A_4 + m_2 (b_2^2 + \rho_2^2) \ddot{\psi}_2 + C \psi_2 - R_x \ell (\gamma - \psi_2) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Із системи рівнянь (12) можливо визначити силові характеристики МСА і отримати диференціальні рівняння для кута повороту знаряддя  $\psi_2$ .

Дійсно, з рівнянь 1, 2 і 4 системи (12) отримуємо рівняння для визначення кута повороту ґрунтообробного знаряддя  $\psi_2$

$$\ddot{\psi}_2 + A(t)\psi_2 = B(t), \quad 0 \leq t < t_0, \quad (13)$$

$$\text{де } A(t) = \frac{\gamma D + A_4 + \ell A_2}{\gamma m_2 (b_2^2 + \rho_2^2 - \ell b_2)}, \quad B(t) = - \frac{(A_4 - \ell A_2)}{m_2 (b_2^2 + \rho_2^2 - \ell b_2)}. \quad (14)$$



Величини  $A(t)$  та  $B(t)$  є відомими та виражаються через компоненти прискорень, що були отримані в результаті вимірювань у двох контрольних точках трактора.

Для розрахунку кутів відхилення трактора і сільськогосподарського знаряддя була розроблена комп'ютерна програма, яка використовувала весь масив даних про зміну бокового прискорення (рис.2). З посиланням на розрахунки цієї програми побудуємо графіки динаміки кутів відхилення складових ґрунтообробного агрегату рис. 3.

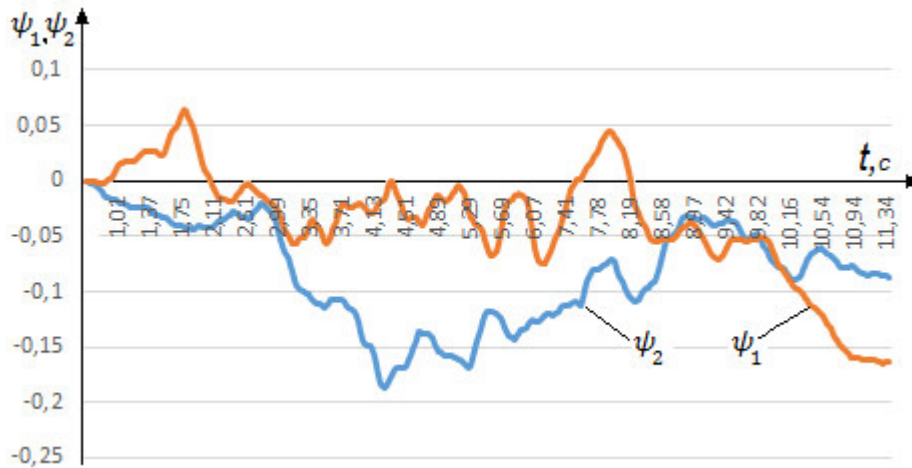


Рис.3. Графік динаміки кутів відхилення ґрунтообробного агрегату МТЗ-80+КПС-4:  $\psi_1$  – динаміка кута з шинами нормального тиску;  $\psi_2$  – динаміка кута з приспущеними шинами.

Проаналізувавши графіки динаміки кутів відхилення ґрунтообробного агрегату з'ясували, що у випадку коли шини приспущені кути відхилення збільшуються і стійкість агрегату при виконанні технологічних операцій зменшується. Такий висновок стає очевидним тому, що через зниження тиску в шині зменшується її бокова жорсткість.

*Висновки.* Скориставшись можливостями математичного моделювання та відомими формулами було доведено, що на основі експериментальних даних отриманих за допомогою, розробленого контрольно-вимірювального комплексу, можливо провести розрахунки кутів відхилення, які впливають на динамічну і функціональну стабільність мобільних сільськогосподарських агрегатів при виконанні агротехнічних операцій.

Розроблений метод надає широкі можливості для його використання в багатьох галузях народного господарства, які допомагають забезпечити ефективну роботу агропромислового комплексу і народного господарства.



### Література.

1. *Погорельий Л.В.* Земледельческая механика, машиноведение и сельскохозяйственная техника в XX – начале XXI века. / *Л.В. Погорельий* // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – № 8, 2004. – С. 51 – 56.
2. *Василенко П.М.* Методика построения расчетных моделей функционирования механических систем (машин и машинных систем). *П.М. Василенко, В.П. Василенко.* – К.: Колос, 1980. – 135с.
3. *Гячев Л.В.* Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов. / *Л.В. Гячев.* – М.: Машиностроение, 1981. – 206с.
4. *Надикто В.Т.* Нові мобільні енергетичні засоби України. Теоретичні основи використання в землеробстві. / *В.Т. Надикто, М.Л. Крижачківський, В.М. Кюрчев, С.Л. Абдула.* Навчальний посібник // Міністерство аграрної політики України, Мелітополь, 2005. – 338с.
5. *Синеоков Г.Н.* Теория и расчет почвообрабатывающих машин. / *Г.Н. Синеоков, И.М. Панов.* – М.: Машиностроение, 1977. – 328с.
6. *Лебедев А.Т., Артьомов М.П.* Обґрунтування ефективності використання ґрунтообробних машинно-тракторних агрегатів моделюванням парціальних прискорень / *А.Т. Лебедев, М.П. Артьомов* // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук.пр. / ДНУ УкрНДПВТ ім.Л.Погорілого – Дослідницьке, 2013. – Вип. 17(31), кн. 2. – С.280 – 293.
7. Динамика автомобиля / [*М.А. Подригало, В.П. Волков, А.А. Бобошко, В.А. Павленко, В.Л. Файст, Д.М. Клец, В.В. Редько*] Под ред. *М.А. Подригало.* – Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2008. – 424 с.
8. Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин / [*Н.П. Артемов, А.Т. Лебедев, М.А. Подригало, А.С. Полянский, Д.М. Клец, А.И. Коробко, В.В. Задорожная*] Под ред. *М.А. Подригало.* – Харьков: Міськдрук, 2012. – 220 с.
9. *Артьомов М.П.* Математична модель машинно-тракторного агрегату з використанням метода парціальних прискорень / *М.П. Артьомов* // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вінниця, 2012. Випуск 11 т.1(65) – С.34 – 40
10. Определение необходимого числа акселерометров и места их установки при динамических испытаниях мобильных машин / *М.А. Подригало, Н.П. Артемов, Д.М. Клец, А.И. Коробко* // Технические науки: Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – Симферополь, 2012, – Вып.36 – С. 20 – 26.



**УПРАВЛЯЕМОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ  
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МОБИЛЬНЫХ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ  
МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПАРЦИАЛЬНЫХ УСКОРЕНИЙ**

Артёмов Н.П.

**Аннотация – В работе предложена методика определения углов отклонения трактора и сельскохозяйственных машин в процессе работы почвообрабатывающих мобильных сельскохозяйственных агрегатов и их влияние на выполнение агротехнических операций. Использование современных приборов и методов расчета позволяет выбирать оптимальные решения для расчета и комплектования мобильных сельскохозяйственных агрегатов, а так же сократить эксплуатационные расходы.**

**CONTROLLABILITY AND STABILITY OF MOTION TILLAGE  
MOBILE AGRICULTURAL UNITS MODELING PARTIAL  
ACCELERATIONS**

N. Artiomov

*Summary*

**In the paper we propose a method of determining the angle of deviation of the tractor and agricultural machinery in the process of tillage mobile agricultural units and their impact on the performance of farming operations. The use of modern instruments and methods of calculation allows you to choose the best solutions for the calculation and the acquisition of mobile agricultural units, as well as reduce operating costs.**