

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПАРЦИАЛЬНЫХ УСКОРЕНИЙ

Николай Артёмов

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенко*

Ул. Артема 44, Харьков, Украина. E-mail: khstua@lin.com.ua

Николай Artiomov

*Kharkiv National Technical University of Agriculture named Petro Vasylenko
St. Artem 44, Kharkiv, Ukraine. E-mail: khstua@lin.com.ua*

Аннотация. В работе предложена методика определения углов отклонения трактора и сельскохозяйственных машин в процессе работы машинно-тракторных агрегатов (МТА) и их влияние на выполнение агротехнических операций. Использование современных приборов и методов расчета дает возможность выбирать оптимальные решения для расчета и комплектования машинно-тракторных агрегатов, а так же сократить эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат, динамические параметры, управляемость, парциальные ускорения.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Уровень управляемости может характеризовать степень совершенства и технического состояния машинно-тракторного агрегата, как объекта исследования. Управляемость объекта отражает его способность адекватно реагировать на любое управляющее воздействие. МТА, как механическая система, постоянно находится под действием различного рода возмущений, способствующих отклонению его от прямолинейной траектории движения.

Управляющие воздействия вызывают переход этой системы от одного состояния равновесия к другому. При этом изменяются исходные параметры системы.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ отечественных и зарубежных источников показывает, что технологические и технико-экономические показатели МТА, во многом, зависят от управляемости и устойчивости их движения.

До тех пор пока техника двигалась с не-

большими поступательными и угловыми скоростями, вопрос об устойчивости и управляемости МТА среди ученых мало обсуждался [12,17]. Однако с увеличением энергонасыщенности сельскохозяйственных агрегатов перед исследователями возникла проблема определения воздействий на динамические параметры МТА сил и моментов, которые влияют на работу, а его движение, будет управляемым и устойчивым. При исследовании движения МТА, выполняющего агротехнические операции, можно представить многозвенной механической системой, на которую действуют внешние силовые факторы [5,9,14,20]. Поэтому такое движение необходимо рассматривать как изменяющееся на протяжении определенного времени расположение МТА и его составляющих на поле и по отношению друг к другу, в зависимости от действующих сил. В большинстве научных трудов для изучения управляемости и устойчивости движения МТА авторы используют методы функций и вектор-функций Ляпунова [3,11]. Вместе с тем использование этих методов в решении конкретных научных и технических проблем сталкивается с определенными трудностями, которые связаны с построением функций Ляпунова. Поэтому вопрос разработки методов решения задач управляемости и устойчивости с их использованием, остаются актуальными и сложными в применении [4,5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На качественное выполнение технологических операций и на динамическую нагруженность по разному влияют устойчивость движения и управляемость агрегата, расположение сельскохозяйственных орудий в отношении энергетического средства (трактора).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ПАРЦИАЛЬНЫХ УСКОРЕНИЙ

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить углы отклонения трактора и почвообрабатывающего орудия с учетом сил, которые влияют на расположение агрегата при изменении внешних сил и технического состояния;

- оценить влияние углов отклонения почвообрабатывающего агрегата на его устойчивость и управляемость.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для решения задач статистической и общей динамики мобильных сельскохозяйственных агрегатов возникает необходимость в построении моделей их движения. В общем случае уравнение движения мобильных агрегатов будут нелинейными и это значительно усложняет задачу контроля за влиянием управляющих воздействий на обеспечение качества выполнения агротехнических операций. При проведении исследований по устойчивости и управляемости почвообрабатывающих агрегатов нами была использована методика, отличающаяся от ранее известных.

Для основной обработки почвы в хозяйствах используется плуг. В отличие от других видов сельскохозяйственных орудий, плуг поддерживается в заданном режиме работы динамической реакцией почвы [4,15,18]. Поэтому большое количество стохастических силовых факторов, которые воздействуют на почвообрабатывающее орудие, обусловлены неоднородностью физико-механических свойств почвы, неровностями поверхности поля и т.д.

В этом случае под динамической устойчивостью движения почвообрабатывающего орудия необходимо понимать такое движение, при котором малое возмущение не приводит к нарастанию расхождений между определенным параметром (например, углом отклонения трактора или плуга) возмущенного и исходного рабочего движения агрегата.

Таким образом, ссылаясь на [1,6,7], будем считать, что движение МТА устойчиво, если он слабо реагирует на возмущение и при отклонении от траектории не выходит за пределы агротехнических ограничений. После воздействия внешних сил агрегат стремится возвратиться к исходному, или близкому к нему движению.

При таком методе исследования устойчивости системы "трактор – почвообрабатывающее орудие – почва" одной из основных является проблема контроля углов отклонения трактора и орудия от заданной траектории. Для решения этой задачи предлагается использовать метод парциальных ускорений [8]. Контроль траектории движения возможен, по определению, в горизонтальной плоскости. Рассмотрим случай плоскопараллельного движения почвообрабатывающего агрегата. Схема динамической модели почвообрабатывающего агрегата представлена на рис.1.

В работе [2] получена система нелинейных дифференциальных уравнений, моделирующая плоскопараллельное движение такой динамической системы. Основными параметрами для контроля управляемости и устойчивости движения этой динамической системы выбираем: ψ_1 – курсовой угол трактора по отношению к оси ОХ и ψ_2 – угол отклонения прямой проходящей через центр масс плуга и навески в точке крепления к трактору (см.рис.1.).

Суть предлагаемого метода заключается в следующем. Предположим, что известны ускорение в двух контрольных точках M_1 и M_2 трактора, как функция времени на некотором интервале $(0, t)$. Такие данные могут быть получены с помощью датчиков на основе акселерометров. Координаты точек M_1 и M_2 известны по отношению к системе координат, жестко связанной с машинно-тракторным агрегатом. Введем обозначения для компонент ускорений в этих точках $M_1 - a_{x1}, a_{y1}$, $M_2 - a_{x2}, a_{y2}$. Компоненты ускорений измеряются относительно неподвижной системы координат, в которой анализируется управляемость и устойчивость движения МТА.

На основе общих теорем кинематики плоскопараллельного движения абсолютно твердого тела [10], получим следующие зависимости курсового угла ψ_1 трактора с компонентами ускорений в точках M_1 и M_2 :

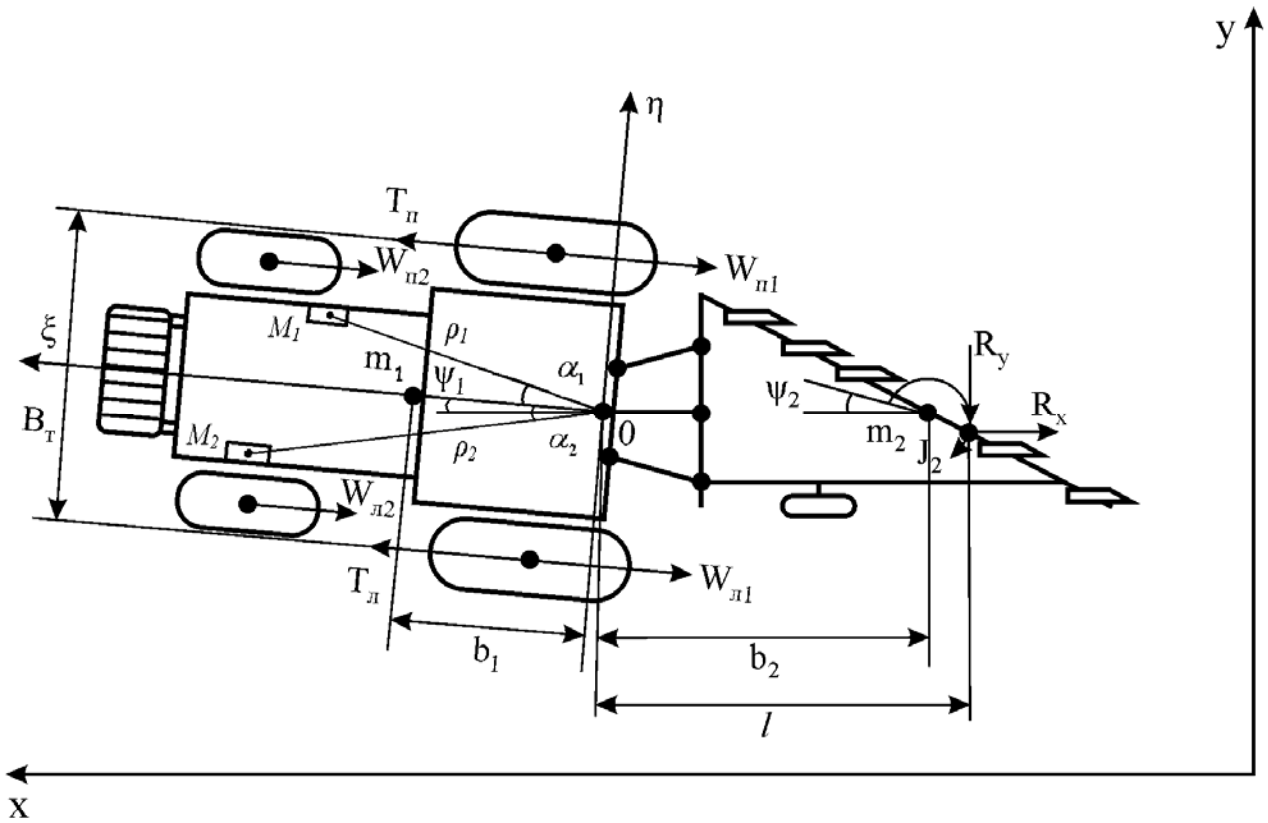


Рис. 1. Схема динамической модели МТА и размещения датчиков контрольно-измерительного комплекса

Fig. 1. Scheme dynamic model MTU sensor and location of test set

$$\Delta a_x = \psi_1'' [\rho_2 \sin(\psi_1 - \alpha_2) - \rho_1 \sin(\psi_1 + \alpha_1)] + \psi_1'^2 [\rho_2 \cos(\psi_1 - \alpha_2) - \rho_1 \cos(\psi_1 + \alpha_1)], \quad (1)$$

$$\Delta a_y = \psi_1'' [\rho_1 \cos(\psi_1 + \alpha_1) - \rho_2 \cos(\psi_1 - \alpha_2)] + \psi_1'^2 [\rho_2 \sin(\psi_1 - \alpha_2) - \rho_1 \sin(\psi_1 + \alpha_1)],$$

где: величины $\alpha_1, \alpha_2, \rho_1, \rho_2$ являются координатами датчиков ускорений, а $\Delta a_x = a_{x1} - a_{x2}$, $\Delta a_y = a_{y1} - a_{y2}$. После ряда преобразований из уравнения (1) получим дифференциальное уравнение для определения курсового угла трактора

$$\psi_1'' = \sqrt{\frac{\Delta a_x^2 + \Delta a_y^2}{\Delta}} \sin(\psi_1 - \varphi), \quad (2)$$

где: $\Delta = \Delta_1^2 + \Delta_2^2$, $\Delta_1 = \rho_2 \cos \alpha_2 - \rho_1 \cos \alpha_1$, $\Delta_2 = \rho_2 \sin \alpha_2 + \rho_1 \sin \alpha_1$,

$$\varphi = \text{arctg} \left(\frac{\Delta_1 \Delta a_x + \Delta_2 \Delta a_y}{\Delta_1 \Delta a_y - \Delta_2 \Delta a_x} \right)$$

Выражение (2) является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка. При использовании стандартных численных методов легко получить его решение. Такой подход дает возможность в процессе движения МТА контролировать

отклонения $\psi(t)$ от заданного направления и тем самым оценивать устойчивость и управляемость агрегата. На рис. 2 представлены расчетные зависимости курсового угла ψ_1 от времени, полученные с помощью (2) по результатам экспериментальных измерений ускорений в двух контрольных точках M_1 и M_2 .

Норберт Винер, основатель кибернетики, обращал внимание на необходимость управления динамической системой с целью ее сохранения от саморазрушения [19]. То есть, управляемость является необходимым элементом для функционирования всех возможных систем. В процессе исследования линейных моделей движения мобильных агрегатов было установлено, что их движение, с некоторыми ограничениями, можно представить состоящим из двух не связанных движений: продольного и бокового, при этом продольное движение определяется колебаниями агрегата продольно-вертикальной плоскости, а боковое – в горизонтальной плоскости [13]



Рис. 2. График расчетной зависимости угла отклонения трактора
Fig. 2. Figure calculated depending on the angle of deviation of the tractor

Отметим также, что полагая, $\psi_1 = U_1$, $\dot{\psi}_1 = U_2$, легко получить следующую нелинейную систему эквивалентную (2):

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = U_2 \\ \dot{U}_2 = \sqrt{\frac{\Delta a_x^2 + \Delta a_y^2}{\Delta}} \sin(U_1 - \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

Для исследования устойчивости этой системы можно применять метод функций Ляпунова[11].

Наряду с курсовым углом трактора, другим параметром с помощью которого возможно оценивать управляемость и устойчивость движения МТА, является угол отклонения ψ_2 почвообрабатывающего орудия (см.рис.1). Следующим шагом является получение зависимостей, которые позволят провести расчеты этого параметра по результатам измерения компонент ускорений Δa_x и Δa_y .

Как показано в [2,15], плоскопараллельное движение МТА, исследуемой двухмассовой динамической модели с четырьмя степенями свободы, возможно, описать следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)\ddot{\xi} - m_1 b_1 \ddot{\psi}_1 \sin \psi_1 - m_1 b_1 \dot{\psi}_1^2 \cos \psi_1 - \\ - m_2 b_2 \ddot{\psi}_2 \sin \psi_2 - m_2 b_2 \dot{\psi}_2^2 \cos \psi_2 = \cos \psi_1 \bar{F}_1 - \\ - \cos \psi_2 R_x + \sin \psi_2 R_y, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)\ddot{\eta} + m_1 b_1 \ddot{\psi}_1 \cos \psi_1 - m_1 b_1 \dot{\psi}_1^2 \sin \psi_1 + \\ + m_2 b_2 \ddot{\psi}_2 \cos \psi_2 - m_2 b_2 \dot{\psi}_2^2 \sin \psi_2 = \sin \psi_1 \bar{F}_1 + \\ + \cos \psi_2 R_y + \sin \psi_2 R_x, \\ m_1(b_1^2 + \rho_1^2)\ddot{\psi}_1 + m_1 b_1 \left(\ddot{\eta} \cos \psi_1 - \dot{\xi} \sin \psi_1 - \right. \\ \left. - \dot{\eta} \dot{\psi}_1 \sin \psi_1 - \dot{\xi} \dot{\psi}_1 \cos \psi_1 \right) + \\ + D(\psi_1 - \psi_2) + m_1 b_1 \dot{\psi}_1 (\dot{\eta} \sin \psi_1 + \dot{\xi} \cos \psi_1) = \bar{F}_2 \frac{B_T}{2}, \\ m_2(b_2^2 + \rho_2^2)\ddot{\psi}_2 + m_2 b_2 \left(\ddot{\eta} \cos \psi_2 - \dot{\xi} \sin \psi_2 - \right. \\ \left. - \dot{\eta} \dot{\psi}_2 \sin \psi_2 - \dot{\xi} \dot{\psi}_2 \cos \psi_2 \right) - \\ - D(\psi_1 - \psi_2) + m_2 b_2 \dot{\psi}_2 (\dot{\eta} \sin \psi_2 + \dot{\xi} \cos \psi_2) = \\ = -\sin \psi_2 IR_x + \cos \psi_2 IR_y, \end{aligned} \quad (4)$$

где:

$$\begin{aligned} \bar{F}_1 = F_1 + F_2, \quad \bar{F}_2 = F_1 - F_2, \\ F_1 = T_{\pi} + T_{\pi} - W_{\pi 1} - W_{\pi 2} - W_{\pi 1} - W_{\pi 2}, \\ F_2 = T_{\pi} - T_{\pi} - W_{\pi 1} - W_{\pi 2} + W_{\pi 1} + W_{\pi 2}, \end{aligned}$$

— тяговые усилия приведенные к правому и левому ведущим колесам трактора с учетом сил сопротивления качению, R_x, R_y — проекции равнодействующей силы сопротивления сельскохозяйственного орудия на оси X, Y независимой системы координат,

ξ и η — продольная и поперечная координаты точки крепления почвообрабатывающего орудия к трактору (см.рис.1).

После проведения моделирования (1) и (4) получим следующее выражение для угла отклонения ψ_2 почвообрабатывающего орудия:

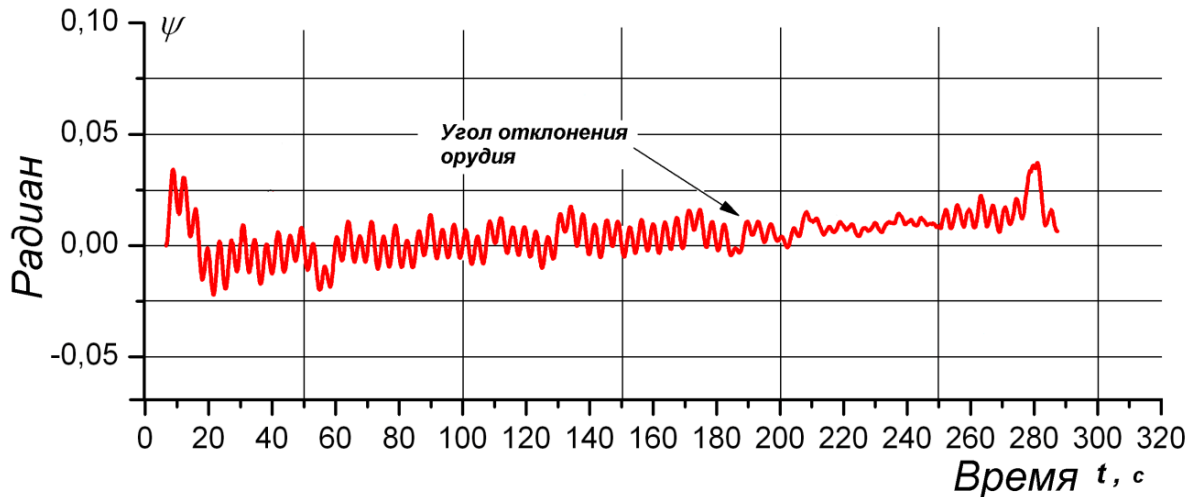


Рис. 3. График расчетной зависимости угла отклонения почвообрабатывающего орудия
 Fig. 3. Figure calculated based deflection tillage tools

$$\psi_2 = \bar{C}(t) \sin(ft - \bar{\varphi}), \quad (5)$$

где: $\bar{C}(t) = \frac{1}{f} \sqrt{\left(\int_0^t C(t) \sin ft \right)^2 + \left(\int_0^t C(t) \cos ft \right)^2}$,

$$\bar{\varphi} = \arctg \left(\frac{\int_0^t C(t) \sin ft \, dt}{\int_0^t C(t) \cos ft \, dt} \right).$$

Функция $C(t)$ может быть выражена через компоненты ускорений Δa_x и Δa_y , курсовой угол трактора ψ_1 и имеет вид:

$$C(t) = f^2 \left[\begin{array}{l} \psi_1 + \frac{\Delta a_x}{D} (D_2(lm_1 + m_2(l - b_2)) - m_1 b_1 D_3) + \\ + \frac{\Delta a_y}{D} (D_1(lm_1 + m_2(l - b_2)) - m_1 b_1 D_4) \end{array} \right].$$

Для этого выражения: $f = \sqrt{\frac{D}{m_2(b_2^2 + \rho_2^2 - b_2 l)}}$,

$$D_1 = \Delta^{-1}(\bar{x}_1 \bar{x}_2 - \bar{y}_1 \bar{y}_2 - \bar{x}_1^2 - \bar{y}_1^2),$$

$$D_2 = \Delta^{-1}(\bar{y}_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 \bar{y}_2), \quad D_3 = \Delta^{-1}(\bar{y}_1 + \bar{y}_2),$$

$$D_4 = \Delta^{-1}(\bar{x}_2 - \bar{x}_1), \quad \Delta = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2 + (\bar{y}_1 + \bar{y}_2)^2,$$

$$\bar{x}_1 = \rho_1 \cos \alpha_1, \quad \bar{y}_1 = \rho_1 \sin \alpha_1,$$

$$\bar{x}_2 = \rho_2 \cos \alpha_2, \quad \bar{y}_2 = \rho_2 \sin \alpha_2,$$

m_1 и m_2 – массы трактора и почвообрабатывающего орудия, соответственно, D – коэффициент приведенной жесткости навесного устройства трактора.

Необходимо отметить, что при расчете уравнения (5) предполагалось получение небольших углов отклонения.

На рис. 3 приведена расчетная зависи-

мость угла отклонения почвообрабатывающего орудия, как функция времени.

Таким образом, на основе метода частных ускорений [8] разработана методика расчета изменения курсового угла трактора и угла отклонения почвообрабатывающего орудия. Это позволяет в реальном масштабе времени контролировать устойчивость и управляемость движения машинно-тракторного агрегата.

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенный подход для исследования управляемости и устойчивости движения МТА, представленного в виде двухмассовой динамической системы (уравнение (4)), которая моделирует движение МТА и экспериментальную методику измерения ускорений можно использовать для определения углов отклонения агрегата в процессе его работы.

Полученные результаты, во время переходного процесса работы агрегата, могут быть использованы при моделировании нагрузок почвообрабатывающих агрегатов.

Устойчивость движения почвообрабатывающего орудия улучшится в случае, если уменьшить жесткость соединительного узла, или увеличить расстояние от точки присоединения до центра масс орудия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Artiymov M. P., Podrigalo M. A., Klets D. M. 2011. Doslidzhennia dinamyky silskogospodarskih agregativ. Ukrainsky mizhvidomchi naukovy-

- tehnichni zbirnik Avtomatizatsia virobnychikh protsesiv u mashinobuduvani ta priladobuduvani Lviv. : Vidavnistvo Lvivska politehnika, Vipusk 45, 435 – 439.
2. Artiymov M. P. 2012 Matematichna model mashinno-traktornogo agregatu z vikoristaniem metoda partsialnih priskoren / M. P. Artiymov // Zbirnik naukovikh prats Vinitskogo natsionalnogo agranogo universitetu. Seria Tehnichni nauki Vinitsa, Vipusk 11, t.1(65). 34 – 40.
3. Chetaev N. G. 1990 Ustoichivost dvizhenia. – M. : Nauka – 175.
4. Gorbunov S. S. 2000 Osnovi teorii dvizhenia pluga kak dinamicheskoi sistemi s peremenimi parametrami. Traktori I selskohoziastvenie mashini, № 1, 29 – 32
5. Giachev L. V. 1981 Ustoychivost dvizhenia selskohoziastvenih mashin I agregatov. - M. : Mashinostroenie – 206.
6. Khachatrian K. A. 1974 Stabilnost raboti pochvoobrabativaiushchih agregatov. M. : Mashinostroenie – 206.
7. Melnichuk D, Shostak A. 2006. About system criteria development and coefficients calculation for an estimation of agrarian-educational lectures yearly performance. MOTROL. Motoryzacija i energetyka rolnictwa. Lublin, Tom 8. 138–148.
8. Metod partsialnih uskoreni I ego prilozhenia v dinamike mobilnih mashin. / [N. P. Artiymov, A. T. Lebedev, M. A. Podrigalo, A. S. Poliansky, D. M. Klets, A. I. Korobko, V. V. Zadorozhny], Kharkov: iz-dvo "Miskdruk", 2012. – 220.
9. Nadikto V. T., Krizhachkivski M. L., Kurchev V. M. 2005. Novi mobilni energetichni zasobi Ukraini. Teoretichni osnovi vikoristania v zemlerobstvi. Navchalni posibnik / Ministerstvo agrarnoi politiki Ukraini. Melitopol – 338.
10. Liapunov A. M. 1982. Lektsii po teoreticheskoi mehanike. - K.: Naukova dumka – 362.
11. Liapunov A. M. 1950. Obshchaia zadacha ob ustoychivosti dvizhenia. - M. – L. : - 473.
12. Pogoreli L. V. 2004 Zemledelcheskaia mehanika, mashinovedenie i selskohoziastvenaia tehnika v XX – nachale XXI veka. Traktori I selskohoziastvenie mashini, № 8, 51 – 56.
13. Samsonov V. A. 2008. Raschet granichnih znachenii osnovnih pokazateley traktora. Traktori I selskohoziastvenie mashini, № 1, 27 – 29.
14. Sineokov G. N., Panov I. M. 1977 Teoria I raschet pochvoobrabativaiushchih mashin / G. N. Sineokov, M.: Mashinostroenie – 328.
15. Tarasik V. P. 1998 Raschet tiagovih karakteristik neustanovivshegosia dvizhenia traktornogo agregata. Traktori I selskohoziastvenie mashini, № 11, 17 – 19.
16. Tayanowskiy G., Wojciech T. 2006. Tractor vibration dynamics evaluation in an aspect of the possibility of coupling and of loading its driving axle. MOTROL, 8A, 271–279.
17. Vasilenko P. M., Vasilenko V. P. 1980. Metodika postroenia raschetnih modeley funktsionirovaniia mehanicheskikh system(mashin I mashinnykh system). - K. : - 173.
18. Vilde A., Cesnieks S., Rucins A. 2004. Minimisation of soil tillage. Polish Academy of Sciences Branch in Lublin/ TEKA Commision of Motorization and Power Industry in Agriculture, Volume IV – Lublin, Poland, 237 – 242.
19. Viner N. 1961. Nelineyni zadachi v teorii sluchainih protsesov. M. : IL. – 158.
20. Zaika P. M. 2001 Teoria silskogospodarskih mashin T.1, ch.1, OKO Kharkiv – 444.

DEFINITION OF MACHINE-TRACTOR UNITS MOTION CONTROLLABILITY AND STABILITY BY MODELING OF PARTIAL ACCELERATING

Summary The article is devoted to presentation of a method for determining the deviation angles of tractor and agricultural machinery during machine-tractor units (MTU) and their impact on the execution of farming operations. The using of modern devices and calculation methods makes it possible to choose the optimal solution for the calculation and completion machine-tractor units and reduce operating costs.

Key words: machine-tractor unit, dynamic parameters, control, partial acceleration.