

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ШИРОКОКОЛЕЙНОГО АГРОСРЕДСТВА ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ СПОСОБЕ ЕГО УПРАВЛЕНИЯ

**Владимир Кувачев**

*Таврический государственный агротехнологический университет  
Пр. Б. Хмельницкого, 18, Мелитополь, 72310, Украина. E-mail: [kuvachoff@mail.ru](mailto:kuvachoff@mail.ru)*

**Vladimir Kuvachov**

*Tavria State Agrotechnological University  
B. Khmelnytsky Avenue, 18, Melitopol, 72310, Ukraine. E-mail: [kuvachoff@mail.ru](mailto:kuvachoff@mail.ru)*

**Аннотация.** Перспективными энерготехнологическими средствами для колёсной системы земледелия являются специализированные ширококолёсные агросредства мостового типа. Их управление может строиться за кинематическим или силовым принципом осуществления поворота. При кинематическом повороте применяются схемы поворотом управляемых колёс (передних, задних или одновременно и передних, и задних) относительно остова машины. Наибольшее распространение у мостовых тракторов получили схемы поворота с управляемыми колёсами.

В статье представлены теоретические основы динамики плоскопараллельного движения специализированного ширококолёсного агросредства в горизонтальной плоскости при кинематическом способе его управления (поворотом колёс).

В основу теоретических исследований положены основные принципы теоретической механики, теории мобильных энергетических средств, статистической динамики и теории автоматического регулирования линейных динамических систем при воспроизведении ими статистически случайных управляющих и возмущающих входных воздействий. В основу анализа оценки степени влияния схемы и параметров исследуемого агросредства на его управляемость и устойчивость движения положены амплитудные и фазовые частотные характеристики. Физическим объектом теоретических исследований являлся опытный образец специализированного агросредства с шириной колеи 2,8 м.

Математические модели движения агросредства представлены в дифференциальной и операторной форме записи. На основании математических моделей построены расчетные амплитудно- и фазово-частотные характеристики отработки динамической системой управляющего воздействия, представленное средним углом поворота передних колёс агросредства, при различных поступательных скоростях его движения. Построенные математические модели, амплитудно- и фазово-частотные характеристики позволяют оценить влияние параметра управляющего воздействия специализированного ширококолёсного агросредства, а также его конструктивных и других параметров на управляемость и устойчивость движения.

**Ключевые слова:** Controlled Traffic Farming, Wide Span Tractor, колёсное земледелие, мостовой трактор, теоретические исследования, движение в горизонтальной плоскости.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Разработка и распространение в последние годы систем «точного земледелия», развитие информационных технологий и т.п. позволили сформулировать концепцию управляемого адаптивного земледелия, то есть определить место и роль механизированных технологий и машин в производстве рентабельной продукции [1]. Исходя из вышеупомянутой концепции следует, что средства механизации для сельскохозяйственного производства должны быть максимально эффективными.

Стремительное развитие колёсной системы земледелия (Controlled Traffic Farming - CTF) [2-5] в последнее время в мире убедительно свидетельствует о широких перспективах использования «мостовых тракторов» (Wide Span Tractor) [6, 7].

Мостовой трактор для колёсной системы земледелия, как и любое мобильное энергосредство, представляет собой сложный объект управления, которое может быть адаптировано к ручному или автоматическому управлению и построено за кинематическим или силовым принципом осуществления поворота [8]. Кинематический поворот, как известно, реализуется поворотом управляемых колёс (передних, задних или одновременно и передних, и задних) относительно остова машины. Наибольшее распространение получили схемы поворота мостовых тракторов с управляемыми колёсами [6, 7].

Известно, что работа какой-либо колёсной машины происходит в условиях действия большого количества возмущающих факторов (сил и их моментов), которые изменяют ее положение в пространстве и отклоняют движение от заданной траектории [9].

Качество отработки тот или иной динамической системы входных переменных зависит от ее характеристик. Относительно ширококолёсного агросредства мостового типа такими есть его схема, а также конструктивные и другие параметры. Поэтому, правильный выбор последних, с позиции нужной управляемости и устойчивости его движения, обеспечивает агросредству оптимальное преобразование управля-

ющего и возмущающего воздействия, действующих на него.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В Украине ученые Таврического государственного агротехнологического университета (г. Мелитополь) создали исследовательский образец специализированного ширококолейного агросредства, предназначенного для выполнения практической всего комплекса сельскохозяйственных работ, движение которого на поле осуществляется по следам постоянной технологической колеи [10, 13]. Согласно требованиям автоматизации указанные специализированные ширококолейные агросредства целесообразно подчинять принципам функционирования координатно-транспортной системы [14].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является разработка динамической модели плоско-параллельного движения в горизонтальной плоскости ширококолейного агросредства при кинематическом способе его управления (поворотом колес), с помощью которой необходимо исследовать влияние параметров внешних воздействий, а также его конструктивно-технологических и других параметров на управляемость и устойчивость движения.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В основу теоретических исследований положены основы теоретической механики, теории мобильных энергетических средств, статистической динамики и теории автоматического регулирования линейных динамических систем при воспроизведении ими статистически случайных управляющих и возмущающих входных воздействий. В частности, в основу анализа оценки степени влияния схемы и параметров исследуемого агросредства на его управляемость и устойчивость движения положены амплитудные и фазовые частотные характеристики [15, 16].

Ширококолейное специализированное агросредство представляет собой довольно сложную динамическую систему. Эта сложность определена ее многомерностью, высоким порядком дифференциальных уравнений движения и особенно наличием нелинейных зависимостей между ее отдельными координатами. Поэтому, на данном этапе изучения динамики ширококолейного агросредства целесообразно рассмотреть его упрощенную схему в виде стационарной линейной модели (рис. 1). Такая идеализация системы во многих случаях, например [17], довольно эффективна для сложных сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления, динамика которых изучена еще недостаточно.

В представленной схеме (рис. 1) влияние всех сил, действующих на агросредство со стороны сельскохозяйственных орудий, выразим через их главный вектор  $R$  (составляющие  $R'$  и  $R''$  соответственно) и главный момент  $M_R$ .

Характер возмущений в полной мере зависит от конструктивной схемы агросредства и его технологического назначения.

С учетом вышеизложенных предположений примем, что исследуемое агросредство осуществляет на гоне равномерное поступательное движение со скоростью  $V_0$  относительно неподвижной горизонтальной плоскости  $XOY$  (рис. 1).

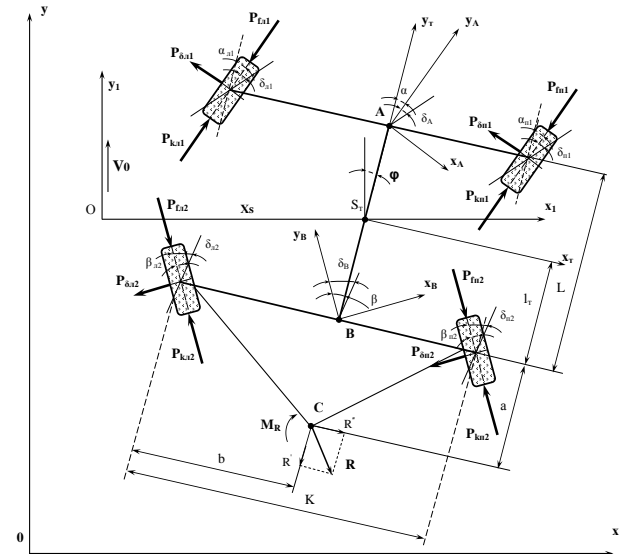


Рис. 1. Схема сил, действующих на агросредство в горизонтальной плоскости при кинематическом способе его управления (поворотом колес)

Fig. 1. Scheme of the forces acting on Wide Span Means in a horizontal plane when the kinematics method of its control (wheel rotation)

В процессе выполнения работы его остов под влиянием случайных возмущений отклоняется от начального положения и получает дополнительные скорости, - начинается его относительное движение по отношению к плоскости  $X_1OY_1$ . При этом плоскость  $X_rS_rY_r$ , связанная с центром масс агросредства, оборачивает его в плоскости  $X_1OY_1$  вокруг оси, проходящей через точку  $S_r$ . Мерой этого поворота служит угол  $\varphi$ , который построен продольной осью  $S_rY_r$  агросредства и осью  $OY_1$ . В процессе относительного движения его центр масс перемещается по оси  $OX_1$ , что характеризуется изменением абсциссы  $X_s$ . Таким образом, исследуемое агросредство по отношению к плоскости  $X_1OY_1$  имеет две степени свободы, которым соответствуют две обобщенные координаты: угол  $\varphi$  и перемещение абсциссы  $X_s$  центра его масс  $S_r$ .

Следует отметить, что даже в линейной интерпретации математическая модель движения ширококолейного агросредства представляет собой систему довольно сложных дифференциальных уравнений. Поэтому, с целью упрощения их составления, приняты следующие допущения: крен и дифферент агросредства отсутствуют; агросредство рассматривается как физическое твердое тело, которое имеет продольную плоскость симметрии, проходящую через центр его масс; колебание тягового сопротивления сельскохозяйственных орудий существенно не влияет на скорость поступательного движения, в силу чего она принимается постоянной; боковое взаимодействие шин агросредства с деформируемой поверхностью рассматривается в рамках гипотезы "бокового увода" [18]; гироскопические и

стабилизирующие моменты шин и моменты сопротивления их скручиванию, относительно вертикальной оси, в силу их малости не учитываются.

При математическом моделировании движения в горизонтальной плоскости ширококолейного агросредства динамическую модель его функционирования удобно рассматривать в виде реакций на входные управляющие и возмущающие влияния, которые однозначно определяют в первом случае - управляемость, а во втором - устойчивость его движения [19].

К внешним силам, действующим на агросредство при его плоско-параллельном движении, можно отнести:

- силы сопротивления перекатывания передних ( $P_{fn1}, P_{fn1}$ ) и задних ( $P_{fn2}, P_{fn2}$ ) колес агросредства;
- касательные силы  $P_{kn1}, P_{kn2}, P_{kn1}, P_{kn2}$ ;
- боковые силы  $P_{\delta n1}, P_{\delta n2}, P_{\delta n1}, P_{\delta n2}$ , которые приводят к возникновению углов увода передних  $\delta_{n1}, \delta_{n1}$  и задних  $\delta_{n2}, \delta_{n2}$  колес агросредства;
- главный вектор  $R$  и главный момент  $M_R$  сил, действующих со стороны сельскохозяйственных орудий.

Для математического описания бокового взаимодействия колесного транспортного средства с агрофоном наиболее часто используется гипотеза «бокового увода» в линейной интерпретации [18]. В этом случае для определения боковых горизонтальных сил в местах контакта колес с почвой используют коэффициенты сопротивления боковому уводу шин согласно гипотезе Рокара [18]. Итак:

$$\begin{aligned} P_{\delta n1} &= k_{n1} \cdot \delta_{n1}, & P_{\delta n1} &= k_{n1} \cdot \delta_{n1}, \\ P_{\delta n2} &= k_{n2} \cdot \delta_{n2}, & P_{\delta n2} &= k_{n2} \cdot \delta_{n2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где:  $k_{n1}, k_{n1}$  и  $k_{n2}, k_{n2}$  – коэффициенты сопротивления увода передних и задних колес агросредства.

Дифференциальные уравнения движения агросредства по отношению к плоскости  $X_1OY_1$  (см. рис. 1) будем составлять в виде уравнений Лагранжа второго рода.

Кинетическая энергия агросредства относительно плоскости  $X_1OY_1$  (рис. 1) состоит из двух слагаемых, отображающих его поступательное и вращательное движение

$$T = (M_m \cdot V_{sm} + J_{sm} \cdot \omega_m) / 2, \quad (2)$$

где:  $M_m$  – масса агросредства;  $V_{sm}$  – линейная скорость центра масс агросредства относительно плоскости  $X_1OY_1$ ;  $J_{sm}$  – момент инерции агросредства относительно его центра масс, рассчитывается по методике [20];  $\omega_m$  – угловая скорость агросредства.

Очевидно, что

$$V_{sm} = \dot{X}_S, \quad \omega_m = \dot{\varphi}. \quad (3)$$

После подстановки в (2) производных угловых и линейных скоростей (3) получим:

$$T = 0,5(M_m \cdot \dot{X}_S^2 + J_m \cdot \dot{\varphi}^2). \quad (4)$$

Взяв производные по принятым обобщенным координатам, после дифференцирования получим:

$$\begin{cases} M_m \cdot \ddot{X}_S = Q_x; \\ J_m \cdot \ddot{\varphi} = Q_\varphi, \end{cases} \quad (5)$$

где:  $Q_x$  и  $Q_\varphi$  – обобщенные силы, определяющие перемещение агросредства по соответствующим обобщенным координатам.

С учетом малости последних, уравнения для определения обобщенных сил имеют вид:

$$\begin{aligned} Q_x &= (P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn1} - P_{fn1}) \cdot \alpha - \\ &- (P_{kn2} - P_{fn2} + P_{kn2} - P_{fn2}) \cdot \beta + R'' - P_{\delta n1} - P_{\delta n2} - P_{\delta n1} - P_{\delta n2}; \\ Q_\varphi &= (L - l_m) [(P_{kn1} - P_{fn1}) + (P_{kn1} - P_{fn1})] \cdot \alpha + \\ &+ l_m [(P_{kn2} - P_{fn2}) + (P_{kn2} - P_{fn2})] \cdot \beta + \\ &+ b(P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn2} - P_{fn2}) - (K - b)(P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn2} - P_{fn2}) - \\ &- (L - l_m)(P_{\delta n1} + P_{\delta n1}) + l_m(P_{\delta n2} + P_{\delta n2}) + M_R - R''(l_m + a), \end{aligned} \quad (6)$$

где:  $L, l_m$  и  $K, a$  – конструктивные параметры прицепа которых понятна из рис. 1,  $\alpha$  и  $\beta$  – средние углы поворота передних и задних колес соответственно.

Используя методику [18] определения углов увода шин и боковых сил, после подстановки (6) в (5) и проведение ряда преобразований получим математическую модель движения ширококолейного агросредства в горизонтальной плоскости при кинематическом способе его управления в дифференциальной форме записи:

$$\begin{cases} A_{11} \cdot \ddot{X}_S + A_{12} \cdot \dot{X}_S + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi = f_{11} \cdot \alpha + f_{12} \cdot \beta + R'', \\ A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{\varphi} + A_{23} \cdot \varphi + A_{24} \cdot \dot{X}_S = f_{21} \cdot \alpha + f_{22} \cdot \beta - \\ - R''(l_m + a) + M_R - (K - b)(P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn2} - P_{fn2}) \\ + b(P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn2} - P_{fn2}), \end{cases} \quad (7)$$

где:  $A_{11} = M_m$ ;

$$\begin{aligned} A_{12} &= (k_{n1} + k_{n2} + k_{n1} + k_{n2}) / V_0; \\ A_{13} &= ((k_{n1} + k_{n1})(L - l_m) - (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_m) / V_0; \\ A_{14} &= - (k_{n1} + k_{n2} + k_{n1} + k_{n2}); \\ f_{11} &= (P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn1} - P_{fn1}) + k_{n1} + k_{n1}; \\ f_{12} &= k_{n2} + k_{n2} - (P_{kn2} - P_{fn2} + P_{kn2} - P_{fn2}); \\ A_{21} &= J_m; \\ A_{22} &= ((k_{n1} - k_{n1})(L - l_m)^2 + (k_{n2} - k_{n2}) \cdot l_m^2) / V_0; \\ A_{23} &= -(k_{n1} + k_{n1})(L - l_m) + (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_m; \\ A_{24} &= (k_{n1} + k_{n1})(L - l_m) - (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_m / V_0; \\ f_{21} &= (L - l_m) \cdot ((P_{kn1} - P_{fn1}) + (P_{kn1} - P_{fn1}) + k_{n1} + k_{n1}); \\ f_{22} &= l_m \cdot ((P_{kn2} - P_{fn2}) - (P_{kn2} - P_{fn2}) - k_{n2} - k_{n2}). \end{aligned}$$

В операторной форме записи система уравнений (7) имеет вид:

$$\begin{cases} K_{11} \cdot X_S(s) + K_{12} \cdot \varphi(s) = F_{11} \cdot \alpha + F_{12} \cdot \beta + F_{13} \cdot R'' + \\ + F_{14} \cdot M_R + F_{15}, \\ K_{21} \cdot X_S(s) + K_{22} \cdot \varphi(s) = F_{21} \cdot \alpha + F_{22} \cdot \beta + F_{23} \cdot R'' + \\ + F_{24} \cdot M_R + F_{25}, \end{cases} \quad (8)$$

где:  $K_{11} = A_{11} \cdot s^2 + A_{12} \cdot s$ ;  $K_{21} = A_{24} \cdot s$ ;  
 $K_{12} = A_{13} \cdot s + A_{14}$ ;  $K_{22} = A_{21} \cdot s^2 + A_{22} \cdot s + A_{23}$ ;  
 $F_{11} = f_{11}$ ;  $F_{21} = f_{21}$ ;  
 $F_{12} = f_{12}$ ;  $F_{22} = f_{22}$ ;  
 $F_{13} = 1$ ;  $F_{23} = -(l_m + a)$ ;  
 $F_{14} = 0$ ;  $F_{24} = 1$ ;  
 $F_{15} = 0$ ;  
 $F_{25} = -(K - b) \cdot (P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn2} - P_{fn2}) +$   
 $+ b \cdot (P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn2} - P_{fn2})$ ;  
 $s = d/dt$  – оператор дифференцирования.

Построенные математические модели (7) и (8) позволяют оценить устойчивость и управляемость движения практически любого ширококолейного агросредства при его кинематическом способе

управления.

В математической модели рассматриваемой динамической системы в операторной форме записи (8) операторами управляющего воздействия являются углы поворота передних  $\alpha$  и задних  $\beta$  колес. А характеристиками возмущающего воздействия являются: составляющая  $R''$  главного вектора  $R$  сопротивления сельскохозяйственного орудия и главный момент  $M_R$ .

Для построения амплитудно- и фазово-частотных характеристик выражения передаточных функций динамики плоско-параллельного движения в горизонтальной плоскости ширококолейного агросредства при кинематическом способе его управления имеют вид:

1) по управляющему воздействию угла поворота передних колес  $\alpha$ :

- по линейному перемещению  $X_S$

$$W_1 = \frac{D_1 + (0,5L - l_m) \cdot D_3}{D_\Delta}, \quad (9)$$

- относительно курсового угла  $\varphi$

$$W_3 = \frac{D_3}{D_\Delta}; \quad (10)$$

2) по возмущающему воздействию силы  $R''$ :

- по линейному перемещению  $X_S$

$$W_2 = \frac{D_2 + (0,5L - l_m) \cdot D_4}{D_\Delta}, \quad (11)$$

- относительно курсового угла  $\varphi$

$$W_4 = \frac{D_4}{D_\Delta}, \quad (12)$$

где:  $D_\Delta, D_1 \dots D_4$  – определители, выражения которых определяются следующим образом:

$$D_\Delta = K_{11} \cdot K_{12} - K_{12} \cdot K_{21};$$

$$D_1 = A_{21} \cdot f_{11} \cdot s^2 + (A_{22} \cdot f_{11} - A_{13} \cdot f_{21}) \cdot s + (A_{23} \cdot f_{11} - A_{14} \cdot f_{21});$$

$$D_2 = A_{21} \cdot F_{13} \cdot s^2 + (A_{22} \cdot F_{13} - A_{13} \cdot F_{23}) \cdot s + (A_{23} \cdot F_{13} - A_{14} \cdot F_{23});$$

$$D_3 = A_{11} \cdot f_{21} \cdot s^2 + (A_{12} \cdot f_{21} - A_{24} \cdot f_{11}) \cdot s;$$

$$D_4 = A_{11} \cdot F_{23} \cdot s^2 + (A_{12} \cdot F_{23} - A_{24} \cdot F_{13}) \cdot s.$$

После подстановки указанных определителей в (9-12) каждая  $i$ -ая передаточная функция примет вид:

$$W_i = \frac{b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0}{a_4 \cdot s^4 + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0}, \quad (15)$$

где:  $a_4 = A_{11} \cdot A_{21}$ ;  $a_3 = A_{11} \cdot A_{22} + A_{12} \cdot A_{21}$ ;  $a_2 = A_{11} \cdot A_{23} + A_{12} \cdot A_{22} - A_{13} \cdot A_{24}$ ;  $a_1 = A_{12} \cdot A_{23} - A_{14} \cdot A_{24}$ ;  $a_0 = 0$ ;  $b_0 \dots b_2$  – коэффициенты, природа которых обусловлена функциональной связью конструктивно-технологических параметров исследуемого агросредства и характеристиками возмущающего и управляющего воздействий:

- для  $W_1$ :  $b_2 = (0,5L - l_m) \cdot A_{11} \cdot f_{21} + A_{24} \cdot f_{11}$ ;

$b_1 = A_{12} \cdot f_{11} - A_{13} \cdot f_{21} + (0,5L - l_m) \cdot (A_{12} \cdot f_{21} - A_{24} \cdot f_{11})$ ;

$b_0 = A_{23} \cdot f_{11} - A_{14} \cdot f_{21}$ ;

- для  $W_2$ :  $b_2 = (0,5L - l_m) \cdot A_{11} \cdot F_{23} + A_{24} \cdot F_{13}$ ;

$b_1 = A_{22} \cdot F_{13} - A_{13} \cdot F_{23} + (0,5L - l_m) \cdot (A_{12} \cdot F_{23} - A_{24} \cdot F_{13})$ ;

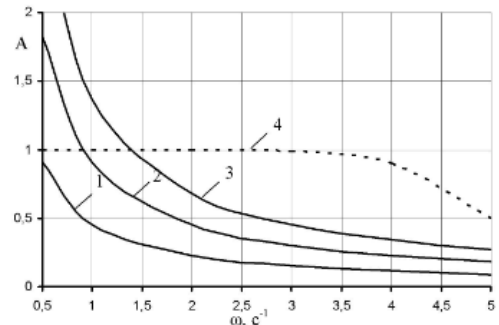
$b_0 = A_{23} \cdot F_{13} - A_{14} \cdot F_{23}$ ;

- для  $W_3$ :  $b_2 = A_{11} \cdot f_{21}$ ;  $b_1 = A_{12} \cdot f_{21} - A_{24} \cdot f_{11}$ ;  $b_0 = 0$ ;

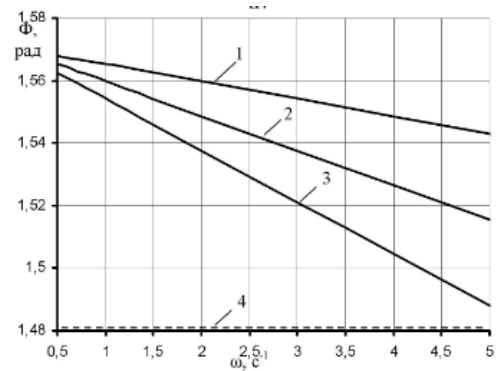
- для  $W_4$ :  $b_2 = A_{11} \cdot F_{23}$ ;  $b_1 = A_{12} \cdot F_{23} - A_{24} \cdot F_{13}$ ;  $b_0 = 0$ .

Физическим объектом теоретических исследований являлся опытный образец специализированного агросредства для колеевой системы земледелия, разработанный в Таврическом государственном агротехнологическом университете [9]. Расчет амплитудно- и фазово-частотных характеристик (рис. 2) осуществлялся при следующих конструктивно-технологических параметрах агросредства:

$M_m = 1000$  кг,  $J_m = 1125$  кг·м<sup>2</sup>,  $K = 2,8$  м,  $L = 2,3$  м,  $l_m = 1,15$  м,  $a = 1$  м,  $b = 1,5$  м, шины марки 11,2R32 со следующими параметрами:  $k_r = k_n = 33446$  Н/град,  $p_{ш} = 0,15$  МПа,  $r_k = 0,6457$  м,  $b_{ш} = 0,284$  м.



а)



б)

**Рис. 2.** Амплитудно- (а) и фазово- (б) частотные характеристики обработки агросредством управляющего воздействия (угла поворота  $\alpha$  передних колес) при различных скоростях его движения: 1 – 1 м/с; 2 – 2 м/с; 3 – 3 м/с; 4 – идеальные характеристики

**Fig. 2.** Amplitude (a) and phase (b) frequency characteristics of the practice Wide Span Tractor control action (the rotation angle  $\alpha$  of the front wheels) at various speeds of motion: 1 – 1 m/s; 2 – 2 m/s; 3 – 3 m/s; 4 – ideal characteristics

Анализ расчетных амплитудно- и фазово-частотных характеристик (рис. 2) показал, что управляемость ширококолейного агросредства существенно зависит от скорости его движения. При низких скоростях движения ( $V_0 = 1$  м/с) имеем существенное недорегулирование в динамической системе управляющего воздействия (угла поворота  $\alpha$  передних колес) (кривая 1, рис. 2а). При этом желаемая частота колебаний угла поворота  $\alpha$  передних колес находится

на уровне  $0,5 \text{ с}^{-1}$ , где значение коэффициента усиления входного управляющего воздействия приближается к  $A = 1$ . Вместе с тем, увеличение скорости движения агросредства до 2 и 3 м/с на низких частотах ( $\omega < 1,3 \text{ с}^{-1}$ ) способствует перерегулированию динамической системы (кривая 2 и 3, рис. 2а), а на частотах  $\omega > 1,3 \text{ с}^{-1}$  наоборот - приближает характеристики к идеальной.

Что касается фазового сдвига отработки динамической системой управляющего воздействия, то при увеличении рабочих скоростей движения агросредства до 3 м/с (кривая 3, рис. 2б) фазово-частотная характеристика наиболее близка к идеальной.

#### ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели и получены новые закономерности плоско-параллельного движения ширококолейного агросредства для колеиной системы земледелия при кинематическом способе его управления.

2. Разработанные теоретические основы позволяют осуществлять обоснование новых схем, конструктивных параметров и режимов работы ширококолейного агросредства с приемлемой управляемостью и устойчивостью его движения в горизонтальной плоскости.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Shevchenko I. 2006.** Адаптивные экофильные технологии и машины для обработки почвы как основа развития системы управляемого земледелия. MOTROL. № 8, 198–203.
2. **Controlled Traffic Farming – CTF.** Available online at: [www.controlledtrafficfarming.com](http://www.controlledtrafficfarming.com).
3. **Скुरатович А. 2008.** Не давите мужики! Не давите!... Обзор: Как выращивать растения и не утаптывать почву. Электронный ресурс: [www.METODOLOG.ru](http://www.METODOLOG.ru).
4. **Улексин В.А. 2008.** Мостовое земледелие. Монография. Днепропетровск, 224.
5. **Надыкто В.Т., Улексин В.А. 2008.** Колеиная и мостовая системы земледелия. Монография. Мелитополь, 270. (Украина).
6. **Chamen W.C.T. 2013.** Wide Span CTF. Available online at: <http://ctfeurope.co.uk/WhatIs/Wide-Span-CTF.aspx>.
7. **Pedersen H.H. 2013.** User requirements for a Wide Span Tractor for Controlled Traffic Farming. Available online at: <http://cigr.org/>.
8. **Улексин В.А. 2011.** Автоматизация управления транспортным средством в мостовом земледелии. Вестник Харьковского НТУСГ им. П. Василенко. Механизация сельскохозяйственного производства. Вып. 107. Т. 2. (Украина).
9. **Гуськов В.В. 1984.** Тракторы: Теория. М.: Машиностроение, 374.

10. **Кувачев В.П., Шульга А.В. 2014.** Пат. №93888 Украина. Мостовое средство для сельскохозяйственных работ. Бюл. № 20. (Украина).
11. **Кувачев В.П., Митков В.Б. 2013.** Способ реализации мостового земледелия. Пат. №84884 Украина. Бюл. №21. (Украина).
12. **Кувачев В.П., Куценко Ю.Н., Ковалев О.В. 2012.** Электрифицированный агромодуль – эффективное решение проблем механизации сельскохозяйственного производства. Труды Таврического ГАТУ. Вып. 12. Т. 2, 86-92. (Украина).
13. **Кувачев В.П. 2013.** Обоснование энергонасыщенности самоходных энерготехнологических средств мостового типа. Сборник научных статей Ставропольского ГАУ по материалам VIII Международной научно-практической конференции «Ресурсо- и энергосбережение в АПК. 101-110.
14. **Кувачев В.П. 2013.** Землеиспользование при обустройстве поля для работы энерготехнологических средств мостового типа. Научный вестник Таврического ГАТУ. Вып. 1. Т. 3, 116-126. (Украина).
15. **Лурье А.Б. 1979.** Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. Л.: Колос, 376.
16. **Лурье А.Б. 1976.** Автоматизация сельскохозяйственных агрегатов. Л.: Колос, 264.
17. **Tayanowskiy G., Tanaś W. 2006.** Учет динамики колебаний трактора в оценке его навесоспособности и нагруженности мостов. MOTROL. 8А, 271–279.
18. **Яровой В.Г. 1970.** Исследование бокового увода тракторных шин и его влияние на некоторые показатели криволинейного движения агрегата: автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. Харьков, 21.
19. **Надыкто В.Т. 2003.** Основы агрегатирования модульных энергетических средств. Мелитополь: КП «ММД», 240.
20. **Тимофеев А.И. 1971.** Движение мобильных сельскохозяйственных машин и агрегатов: автореф. дис. на соискание научной степени докт. техн. наук / Москва, 58.

#### MODELING OF WIDE SPAN TRACTOR PLANE-PARALLEL MOVEMENT IN HORIZONTAL PLANE UNDER THE KINEMATIC METHOD OF ITS CONTROL

**Summary.** Wide span tractors are advanced energy and technological means for controlled traffic farming. Control of modern wheeled vehicles may be adapted to manual operation and can be built according to kinematic turning or forced principle of turning. Under kinematic the schemes for controlled turning wheels have been implemented (front, rear, or front and rear simultaneously) relative to a frame of the machine. The most widespread scheme of turning for wide span tractors are the schemes of steerable wheels turning.

The theoretical foundations of the dynamics of plane-parallel motion of a wide span tractor in a horizontal plane under the kinematic method of its control (wheels turning) have been presents in the article.

In a theoretical study based on the foundations of theoretical mechanics, theory of mobile power equipment, statistical dynamics and the theory of automatic control of linear dynamical systems when the restoration work of their governing statistically control and disturbing input actions. The analysis is assessment of the degree of influence of the scheme and parameters of the studied wide span tractor on its handling and stability of motion based on the amplitude and phase frequency characteristics. Physical object of theoretical studies was the prototype of a specialized wide span tractor with a track of 2.8 m.

A mathematical model of motion wide span tractor in differential operator form of the record are outlined. Calculated amplitude- and phase-frequency characteristics of mining dynamic system control action, represented by the middle angle of the front wheels wide span tractor, under different forward speeds its movement is built on the basis of mathematical models. Constructed mathematical model, the amplitude- and phase-frequency characteristics allow us to estimate the effect of the control action of a wide span tractor, as well as engineering and other parameters on the handling and stability of motion.

**Key words:** Controlled Traffic Farming, Wide Span Tractor, treadway agriculture, theoretical studies, the movement in the horizontal plane.