

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА С ФРОНТАЛЬНО НАВЕШЕННЫМ СЕЛЬХОЗЯЙСТВЕННЫМ ОРУДИЕМ

И.В. Курсов, А.Н. Площаднов

В статье предложена математическая модель управляемого движения машинно-тракторного агрегата в подвижной системе координат в форме, удобной для её последующего использования при подстановке в общую модель системы «водитель – агрегат». Составлена блок-схема системы автоматического управления «водитель-агрегат».

Рост интенсификации сельскохозяйственного производства обуславливает появление новых технологий, предусматривающих выполнение сельскохозяйственных операций машинно-тракторными агрегатами с использованием фронтально навесных машин и орудий. Наибольшее распространение подобные машинно-тракторные агрегаты получили за рубежом, хотя, в настоящее время, число отечественных предприятий, создающих образцы тракторов с возможностью фронтального агрегатирования, также значительно увеличилось.

В последнее время усиливается тенденция установки и на традиционные сельскохозяйственные тракторы, наряду с задним, фронтального навесного устройства. В настоящее время наиболее широкое использование фронтального навесного оборудования наблюдается, в основном, за рубежом, особенно в странах с высоким уровнем сельскохозяйственного производства (США, Германия, Франция и т.д.). В частности, фронтальные навесные устройства успешно используют на таких тракторах, как MB trac, Unimog, Intrac, Deutz, John Deere, Steyr, Renault и т.д.

Использование фронтальной навески для сельскохозяйственного трактора имеет ряд преимуществ: позволяет более рационально распределить силы, действующие на машинно-тракторный агрегат, увеличивает число технологических операций, выполняемых за один проход, уменьшает уплотнение почвы, сокращает сроки проведения сельхозработ, высвобождает механизаторские кадры и т.д.

В [7] отмечается, что при уходе за посевами сахарной свеклы использование фронтальной навески культиватора позволяет добиться увеличения на 25% площади обрабатываемых междурядий. При использовании фронтально навесных орудий улучшаются условия наблюдения за работой рабочих ор-

ганов, появляется возможность уменьшить защитную зону обрабатываемых междурядий. По данным [8] применение передней навески трактора МТЗ-142 для создания комбинированного агрегата, выполняющего культивацию в два следа, позволит при обработке междурядий снизить затраты труда на 36,32%, расход топлива - на 21,88%, прямые эксплуатационные затраты - на 21,04% и повысить производительность на 57,02% по сравнению с базовым агрегатом, выполняющим данную работу за два прохода. Применение комбинированного агрегата дает возможность загрузить трактор на 90%, что позволяет эксплуатировать его в зоне оптимальных характеристик. Производительность МТА на базе колесного трактора с передней навеской на предпосевной обработке почвы и посеве возрастает на 30%, расход горючего на единицу площади, приблизительно, в два раза ниже по сравнению с однооперационным. Урожайность при совмещении операций увеличивается на 4...7%. По данным [9] совмещение операций при возделывании пропашных культур позволяет добиться двукратного снижения уплотнения почвы.

Траектория движения машинно-тракторного агрегата в междурядьях при обработке пропашных культур в общем случае не является прямолинейной и представляет собой некоторую кривую близкую к синусоиде. Это обусловлено рядом причин, вызванных непрямолинейностью рядков растений, а также внешними и внутренними возмущениями, действующими на агрегат. Поэтому, при движении в междурядьях актуальными являются не только проблемы, связанные с обеспечением устойчивости прямолинейного движения агрегата, но и обеспечения его управляемости. Отрицательное влияние фронтально навешенных орудий на управляемость и устойчивость агрегата является одним из основных недостатков фронтального

способа агрегатирования. Некоторые авторы [1,2], исследовавшие вопросы, связанные с устойчивостью и управляемостью машинно-тракторных агрегатов, рассматривают такое их движение, при котором водитель выполняет функцию только задающего устройства. При этом для оценки управляемости обычно используют такие критерии, как чувствительность к управляющему воздействию, запас недостаточной поворачиваемости и т.п. Такой подход не дает полного представления о действительном движении агрегата в междурядьях, поскольку водитель кроме функции задающего устройства, выполняет также функцию регулятора. Т.е. водитель и агрегат при движении представляют собой систему автоматического управления, в которой агрегат является объектом управления.

При этом для оценки управляемости и устойчивости системы «водитель – агрегат» можно использовать критерии, разработанные в теории автоматического управления. Поскольку машинно-тракторный агрегат, как объект управления, является частью системы автоматического управления, математическая модель его движения должна быть представлена в форме, удобной для последующего ее использования при подстановке в общую модель управляемого движения.

Рассмотрим движение агрегата в составе трактора и культиватора навешенного фронтально с помощью приспособления [3] при обработке пропашных культур (рисунок 1).

При управлении водитель старается вести агрегат по определенной траектории, определяемой кривизной рядков. Он оценивает не абсолютное положение агрегата в пространстве, а его положение относительно оси рядка. Поэтому в качестве характеристики динамики управляемого движения агрегата удобнее принять его отклонение от некоторой траектории. Эти отклонения можно представить в виде бокового смещения центра тяжести трактора x_s , углового отклонения продольной оси трактора φ_1 и углового отклонения навешенного орудия относительно продольной оси трактора φ_2 . Иначе говоря, принимаем величины x_s , φ_1 и φ_2 за обобщенные координаты относительного движения агрегата в подвижной системе координат xOy .

Траекторию движения подвижной системы координат xOy зададим в виде некоторого закона изменения кривизны π_ϵ от криволинейной координаты s .

При составлении уравнений модели были использованы следующие допущения:

- остоны трактора и орудия абсолютно твердые тела;
- поступательная скорость движения МТА постоянная;
- движение происходит по горизонтальной сминаемой поверхности (т.е. отсутствуют вертикальные перемещения);
- диссипации энергии не происходит;
- система имеет конечное число степеней свободы;
- связь между частями МТА идеальная.
- угловые перемещения малы

В соответствии с методом Лагранжа уравнения динамики плоского движения в системе отсчета xOy имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_s} = Q_{x_s} + L_s + R_s; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = Q_{\varphi_1} + L_{\varphi_1} + R_{\varphi_1}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = Q_{\varphi_2} + L_{\varphi_2} + R_{\varphi_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где Q_s , Q_{φ_1} , Q_{φ_2} - обобщенные активные силы; L_s , L_{φ_1} , L_{φ_2} - переносные моменты и силы инерции; R_s , R_{φ_1} , R_{φ_2} - обобщенные реакции неголономных связей; T - кинетическая энергия агрегата относительно xOy :

$$T = \frac{1}{2} (I_{s_T} \dot{\varphi}_1^2 + I_{s_M} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + m_T \dot{x}_s^2 + m_M (\dot{x}_s + \dot{\varphi}_1(h-c) + \dot{\varphi}_2 h)^2) \quad (2)$$

где I_{s_T} - момент инерции трактора относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести; I_{s_M} - момент инерции орудия относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести; m_T - масса трактора; m_M - масса орудия; h - расстояние от центра тяжести орудия до точки прицепа; c - расстояние от центра тяжести трактора до точки прицепа.

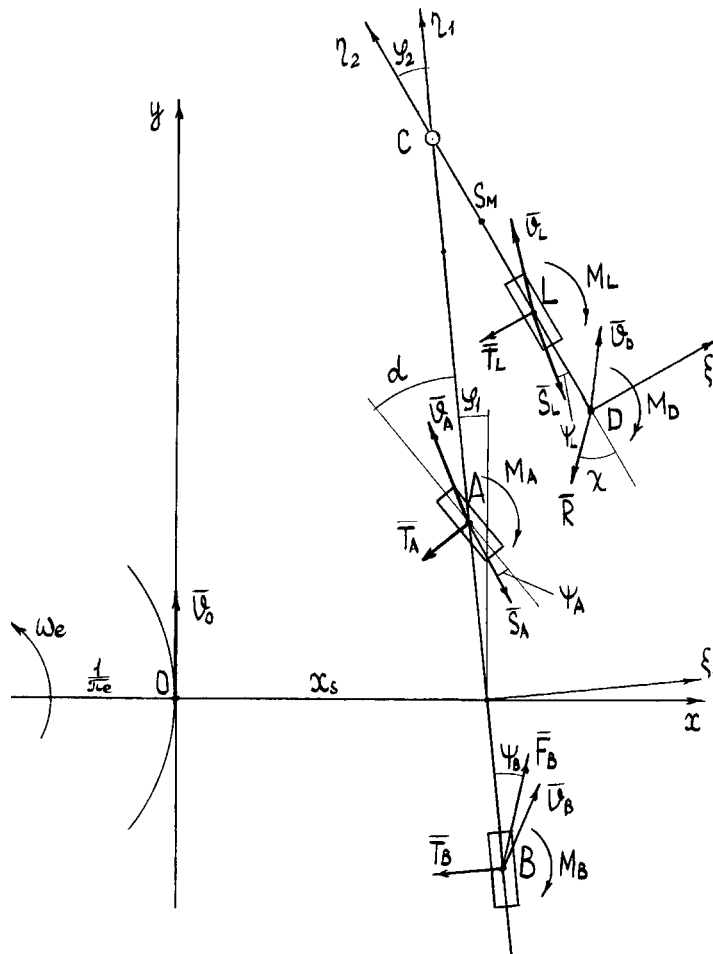


Рисунок 1. Схема относительного движения машинно-тракторного агрегата в подвижной системе координат xOy

Обобщенные силы определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} Q_{x_s} + L_{x_s} + R_{x_s} = -T_B - F_B(\varphi_1 - \Psi_B) + \Phi_T - T_A + \\ + S_A(\varphi_1 + \alpha - \Psi_A) + \Phi_M - T_L + S_L(\varphi_1 + \varphi_2 - \Psi_L) + \\ + R(\varphi_1 + \varphi_2 - \chi); \\ Q_{\varphi_1} + L_{\varphi_1} + R_{\varphi_1} = -T_B b + F_B b \Psi_B - M_B - M_T^u + \\ + T_A a + S_A a(\alpha - \Psi_A) - M_A - \Phi_M(c - h) - M_M^u + \\ + T_L(c - l) - S_L(c \varphi_2 - (c - l)\Psi_L) - M_L - \\ - R(c \varphi_2 - (c - d)\chi) - M_D; \\ Q_{\varphi_2} + L_{\varphi_2} + R_{\varphi_2} = -M_C + \Phi_M h - M_M^u - T_L l - \\ - S_L l \Psi_L - M_L - R d \chi - M_D, \end{cases} \quad (3)$$

где T_A , T_B и T_L поперечные силы, приложенные к колесам A , B и L ; M_A , M_B и

M_L - стабилизирующие моменты колес; S_A , S_L - силы сопротивления перекачиванию переднего A и опорного L колес; F_B - движущая сила заднего ведущего колеса B ; R - главный вектор сил сопротивления рабочих органов; Φ_M , Φ_T - равнодействующие переносных центробежных сил трактора и орудия; M_M^u , M_T^u - главный момент переносных сил инерции трактора и орудия; χ - угол отклонения главного вектора сил сопротивления рабочих органов от плоскости симметрии; M_D - главный момент сил сопротивления; M_C - реактивный момент, передаваемый от трактора к орудию; Ψ_A , Ψ_B , Ψ_L - угол деформации шин; α - угол поворота управляемых колес; a - расстояние от центра тяжести трактора до

передних колес; b - расстояние от центра тяжести трактора до задних колес; d - расстояние от точки прицепа до точки приложения главного вектора сил сопротивления рабочих органов; l - расстояние от точки прицепа до опорного колеса.

Система дифференциальных уравнений дополняется уравнениями неголономных связей. Уравнения неголономных связей составлены на основании двухпараметрической гипотезы увода Л.В. Гячева [1] из условия отсутствия скольжения пятна контакта шин колес.

$$\begin{cases} \bar{v}_B = \bar{v}_0 + \bar{v}_{S_{T0}} + \bar{v}_{BS_T} = \bar{v}_{\Delta_B} + \bar{v}_{\Psi_B} \\ \bar{v}_A = \bar{v}_0 + \bar{v}_{S_{T0}} + \bar{v}_{AS_T} = \bar{v}_{\Delta_A} + \bar{v}_{\Psi_A} \\ \bar{v}_L = \bar{v}_0 + \bar{v}_{S_{T0}} + \bar{v}_{CS_T} + \bar{v}_{CD} = \bar{v}_{\Delta_L} + \bar{v}_{\Psi_B} \end{cases} \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (1) – (4) получим систему линейных дифференциальных уравнений, описывающих движение агрегата относительно подвижной системы координат xOy

$$\begin{cases} a_0\ddot{\varphi}_1 + a_1\dot{\varphi}_1 + a_2\dot{\varphi}_1 + a_3\varphi_1 + a_4\ddot{\varphi}_2 + a_5\dot{\varphi}_2 + \\ + a_6\dot{\varphi}_2 + a_7\varphi_2 + a_8\ddot{x}_s + a_9\dot{x}_s + a_{10}\dot{x}_s + \\ + a_{11}\dot{\alpha} + a_{12}\alpha + a_{13}\ddot{\pi}_e + a_{14}\dot{\pi}_e + a_{15}\pi = 0; \\ b_0\ddot{\varphi}_1 + b_1\dot{\varphi}_1 + b_2\dot{\varphi}_1 + b_3\varphi_1 + b_4\ddot{\varphi}_2 + b_5\dot{\varphi}_2 + \\ + b_6\dot{\varphi}_2 + b_7\varphi_2 + b_8\ddot{x}_s + b_9\dot{x}_s + b_{10}\dot{x}_s + \\ + b_{11}\dot{\alpha} + b_{12}\alpha + b_{13}\ddot{\pi}_e + b_{14}\dot{\pi}_e + b_{15}\pi = 0; \\ c_0\ddot{\varphi}_1 + c_1\dot{\varphi}_1 + c_2\dot{\varphi}_1 + c_3\varphi_1 + c_4\ddot{\varphi}_2 + c_5\dot{\varphi}_2 + \\ + c_6\dot{\varphi}_2 + c_7\varphi_2 + c_8\ddot{x}_s + c_9\dot{x}_s + c_{10}\dot{x}_s + \\ + c_{11}\dot{\alpha} + c_{12}\alpha + c_{13}\ddot{\pi}_e + c_{14}\dot{\pi}_e + c_{15}\pi = 0. \end{cases} \quad (5)$$

где $a_0, \dots, a_{15}$, $b_0, \dots, b_{15}$, $c_0, \dots, c_{15}$ -- коэффициенты, зависящие от параметров агрегата.

Одноконтурная структурная схема движения МТА показана на рисунке 2, где W_{1x_s} , W_{2x_s} , $W_{1\varphi_1}$, $W_{2\varphi_1}$, $W_{1\varphi_2}$, $W_{2\varphi_2}$ - передаточные функции агрегата по линейным x_s и угловым φ_1 , φ_2 перемещениям. W , W_p - передаточные функции водителя по кривизне траекто-

рии (разомкнутая часть системы) и по суммарному эквивалентному отклонению (замкнутая часть).

В качестве регулируемого параметра принято боковое отклонение середины передней оси трактора, представляющее собой сумму отклонений от центра тяжести трактора от заданной траектории x_s и отклонение середины передней оси трактора, обусловленное поворотом трактора на угол φ_1 . Для определения структуры и параметров модели водителя W_p использовался метод определения структуры модели регулятора, исходя из заданного закона работы замкнутой системы при известной передаточной функции объекта управления [6]. Сначала по выбранному закону работы замкнутой системы определяется ее передаточная функция, а затем структура и параметры модели регулятора. Подобный метод позволяет выбрать для системы «водитель - агрегат» оптимальный закон, обеспечивающий минимальную среднеквадратичную ошибку отслеживания заданной траектории. При этом, для получения передаточных функций замкнутой системы применяется интегральное уравнение Винера-Хопфа.

Кривизна траектории в функции криволинейной координаты S подается в две точки схемы: на вход звена W и в звено «агрегат». Для удобства моделирования вместо операции чистого упреждения по времени в звене W , подают кривизну в звено «агрегат» с чистой задержкой на то же время [6]. Таким образом, информация об изменении направления задаваемой траектории движения передается с опережением, что отражает реакцию регулятора на будущее отклонение. В то же время, регулятор реагирует на текущее отклонение траектории движения, осуществляя реакцию на результаты предыдущих управляющих воздействий.

Свойства машинно-тракторного агрегата, как объекта управления, могут быть улучшены не нарушая общей структуры уравнений (5), путём изменения некоторых их коэффициентов. Наиболее эффективным способом повышения управляемости и устойчивости агрегата явилось бы введение дополнительных управляющих сил уменьшающих момент сопротивления повороту и препятствующих его отклонению от заданного направления движению. Реализация этого способа возможна, например, с помощью приспособления [4], в котором используется

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА С ФРОНТАЛЬНО НАВЕШЕННЫМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ ОРУДИЕМ

принцип управления по возмущению, а в качестве сигнала, характеризующего возмущающее воздействие, выбрано угловое отклонение φ_2 орудия.

Таким образом, получена модель управляемого движения машинно-тракторного агрегата, с помощью которой можно исследовать некоторые вопросы устойчивости и управляемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гячев Л.В. Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов. - М.: Машиностроение, 1981. - 206 с.
2. Маршалов Э.С. Моделирование движения МТА в составе автотракторной машины и фронтально навесного культиватора. // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов: Материалы II Международной конференции / Под ред. д.т.н., проф., академика А.Л. Новоселова/ Академия транспорта РФ, АлтГТУ им. И.И. Ползунова – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – С. 93-96.
- 3 Пат. № 2169999 RU, 7 А 01 В 59/041. Фронтальная навеска трактора // А.Н. Площаднов и др. Оpubл. 10.07.2001. Бюл. № 19. - 3 с.

- 4 Пат. № 2174295 RU, 7 А 01 В 59/041. Сельскохозяйственный агрегат // А.Н. Площаднов и др. Оpubл. 10.10.2001. Бюл. № 28. - 3 с
5. Ганькин Ю.А. Динамика управляемого движения мобильных машин. – Самара: Самар. Дом печати, 1997. – 184 с.
6. Динамика системы дорога-шина – автомобиль – водитель. Под. ред. А.А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
7. Глуховский В.С. Требования к индустриальному производству сахарной свеклы // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1983, № 11. - С. 21-24
8. Пархоменко М.Л. Оценка эффективности комбинированных агрегатов с передней навеской на предпосевной обработке почвы // Исследование новых комбинированных машин и рабочих органов для обработки почвы и посева. - Горки. - 1986. - С. 40-43
9. Юшин А.А., Евтенко В.Г., Благодатный Ю.Н. Пути снижения уплотнения почвы мобильным агрегатом // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1985.-№4

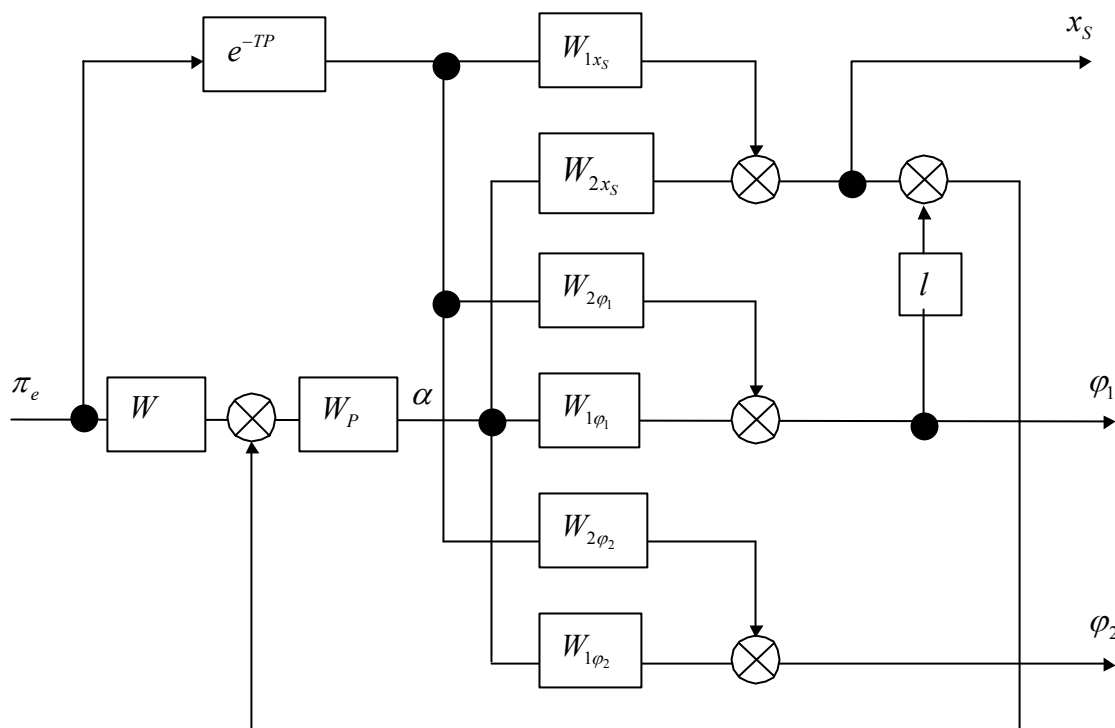


Рисунок 2. Блок-схема моделирования криволинейного движения МТА с фронтально навешенным орудием