

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОПИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОЛЯ ПОДПРУЖИНЕННЫМИ СОШНИКАМИ ПОСЕВНОГО АГРЕГАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

**Е. Я. Строк<sup>1</sup>, Л. Д. Бельчик<sup>2</sup>, А. А. Ананчиков<sup>3</sup>, С. В. Савчук<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, заведующий лабораторией электрогидравлических систем управления Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории электрогидравлических систем управления Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь, e-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

<sup>3</sup> Магистр технических наук, младший научный сотрудник лаборатории электрогидравлических систем управления Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь, e-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

<sup>4</sup> К. т. н., доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета, г. Брест, Беларусь, e-mail: sergeyskb@tut.by

### Реферат

В статье представлены конструкции сошников посевного агрегата, имеющие в своем составе рычажно-пружинные элементы, которые обеспечивают требуемую силу давления на почву и осуществляют высев и заделку семенного материала на необходимую заданную глубину, рассмотрены вопросы повышения качества функционирования электрогидравлического привода рабочих органов посевного агрегата.

**Ключевые слова:** копирование рельефа, поле, посевной агрегат, сошник подпружиненный, электрогидравлическая система управления.

### INCREASING THE ACCURACY OF GROUND CONTOUR FOLLOWING BY SPRING-LOADED COULTERS OF THE SEEDING UNIT WITH USING THE ELECTRO-HYDRAULIC CONTROL SYSTEM

**E. Y. Strok, L. D. Belchik, A. A. Ananchikov, S. V. Sauchuk**

### Abstract

The article presents the designs of the coulters of the sowing unit, which include lever-spring elements that provide the required force of pressure on the soil and carry out sowing and sealing of seed material to the required specified depth, the issues of improving the quality of functioning of the electrohydraulic drive of the working bodies of the sowing unit are considered.

**Keywords:** terrain copying, field, sowing unit, spring-loaded coulters, electrohydraulic control system.

### Введение

Использование многофункциональных комплексов при реализации технологий точного земледелия для посева сельскохозяйственных культур имеет ряд технологических, технических и экономических преимуществ. За один проход они выполняют ряд операций, включающих предпосевную обработку почвы, внесение удобрений, а также посев с сохранением необходимой для всходов влаги. При этом качество выполнения технологического процесса зависит от функционирования каждой составляющей агрегата. Одним из его конструктивно сложных и нагруженных элементов является сошник, который должен разрезать растительные остатки, минимально сдвигать почву и обеспечивать точное внесение семян на заданную глубину.

Для предотвращения поломок на каменистых почвах и обеспечения качества копирования по всей ширине захвата сеялки сошники содержат рычажно-пружинные механизмы, обеспечивающие необходимую силу давления на почву. Так, например, усилия предварительного поджатия пружин 48-ми дисковых сошников почвообрабатывающе-посевного агрегата АППМ-6 «Берестье» регулируются в зависимости от глубины заделки семян в пределах 500...1600 Н, причем для обеспечения заданной глубины укладки семян при высоких скоростях движения агрегата (более 5 м/с) значение указанного параметра необходимо увеличивать, что технически сложно реализовать [1]. Поэтому весьма актуальной является задача повышения точности копирования рельефа поля рабочими органами посевного агрегата при повышенных скоростях его движения.

Сошники индивидуального копирования со стрелчатой лапой и анкерного типа фирмы «Class» предназначены для независимого копирования контура поля и точного поддержания глубины заделки семян в посевном горизонте почвы благодаря параллелограммной конструкции копирующих рычагов и опорного колеса, расположенным

перед сошником [2]. Шарнирные соединения между кронштейном крепления рабочего органа к раме посевной машины и сошником подпружинены, что позволяет регулировать давление на почву для улучшения равномерности заделки семян на необходимую глубину. Конструкция позволяет снизить энергоемкость технологического процесса, увеличить производительность агрегата, снизить расход топлива и повысить урожайность выращиваемых культур.

Компания «Pottinger» в конструкциях своих сеялок использует натяжные пружины для одинакового давления на передние и задние сошники. Точное копирование поверхности почвы по направлению движения благодаря контурному ведению уплотнителя и регулируемому давлению на высевные сошники. Рычаги параллелограммного механизма имеют одинаковую длину, что обеспечивает вертикальное перемещение высевных секций, одинаковое давление сошников на каждый высевной элемент и точную глубину заделки семян [3].

В источниках [4] и [5] отмечено, что увеличение скорости движения посевных агрегатов выше нормативной приводит к неравномерному распределению семян по глубине. Согласно агротехническим требованиям отклонение глубины заделки семян от заданной должно быть не более  $\pm 1$  см (коэффициент вариации до 15 %). Несоблюдение этого условия при посеве зерновых культур приведет к снижению полевой всхожести в зависимости от вида культуры на 5–10 %. При этом снижение урожайности происходит более интенсивно – на 10–30 %. С повышением скорости наблюдается уменьшение глубины заделки семян в результате выглубления сошников, особенно дисковых, причем уменьшение скорости ниже средней на качество заделки семян не влияет. Так, например, сошники зерновой сеялки Астра СПЗ-3,6 производства ПАО «Эльворти» при скорости посева более 2,8 м/с начинают выглубляться и семена попадают не в ложе, а в сухой слой почвы. Различные модификации

посевного комплекса «Кузбасс-Т» имеют удовлетворительное качество посева при скоростях до 4,2 м/с. При увеличении рабочих скоростей точность копирования рельефа поля значительно снижается. Кроме того, при узкорядном посеве сошники переднего ряда разгружаются, так как они дополнительно присыпаются почвой сошниками заднего ряда, особенно на мягких почвах и больших скоростях.

Важной составляющей качественного посева является правильная установка прижимной силы [6]. На практике производители обычно устанавливают пружину, которая давит на секцию рядка с постоянным и обычно избыточным усредненным усилием без учета изменяющегося состояния и плотности почвы, а также снижения веса бункера. В результате этого происходит уплотнение почвы, что препятствует равномерному распределению корневой системы растения по зоне питания и снижает урожайность. Последствия подобного эффекта невозможно исправить, т. к. он становится очевидным только в конце вегетации. С избыточным прижимом приходится сталкиваться чаще, чем с недостаточным, который приводит к неравномерному заглублению семян, результатом чего становятся недружные всходы, что заметно уже в начале вегетационного периода. Компания АО «Геомир» предлагает решить проблему равномерного заглубления семян с использованием системы управления прижимным усилием. Посредством гидроцилиндров двустороннего действия с частотой срабатывания 12 Гц и датчиков нагрузки прижимное усилие регулируется для каждого сошника по величине до оптимального значения, обеспечивающего заданную глубину заделки семян. Контроль качества сева при изменении скорости агрегата осуществляется посредством специальных систем управления и мониторинга прижимной силы и элеваторных трубок, которые устанавливаются непосредственно в кабине трактора или в офисе на компьютере. Для работы этих сервисов требуется высокоточный приемник ГЛОНАСС или GPS, либо наличие на тракторе автопилота с коррекцией точности спутникового сигнала по базовой станции.

В работе [7] рассмотрены вопросы повышения качества функционирования электрогидравлического привода рабочих органов посевного агрегата АППМ-6 «Берестье» при бесконтактном копировании рельефа поверхности. Автор указывает, что использование активной системы высотного регулирования положения сошников с ультразвуковым датчиком расстояния упрощает конструкцию агрегата за счет исключения передних опорных колес, а также позволяет снизить коэффициент вариации глубины обработки почвы и повысить точность копирования рельефа поля в 7,4 раза. Указанный датчик можно установить на раме посевного агрегата в районе оси подвеса или за рабочей зоной сошников. Однако в проведенных с использованием математического моделирования теоретических исследованиях не учтено подпружинивание сошников и не рассматривались вопросы зависимости глубины заделки семян от скорости агрегата.

Авторы работы [8] в результате проведенных лабораторно-полевых испытаний посевного агрегата в составе комплекса АППМ-6 «Берестье» и трактора «Беларус 3022», оборудованного электрогидравлической системой высотного регулирования, установили, что активное управление положением оси подвеса позволяет повысить точность копирования рельефа поля и на 4,5 % увеличить количество семян, заделанных в рабочем слое.

Целью работы является повышение точности копирования рельефа поля посевным агрегатом с подпружиненными сошниками.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: выполнить математическое описание процесса функционирования посевного агрегата, оборудованного электрогидравлической системой высотного копирования рельефа поля; установить влияние изменения скорости движения на выглубление подпружиненных дисковых сошников; разработать рекомендации по повышению точности копирования и глубины заделки семян при высоких рабочих скоростях.

**Теоретические исследования процесса функционирования системы управления рабочими органами посевного агрегата**

Неровности почвы обуславливают продольно-угловые колебания тягового средства, передающиеся через соединительное устройство на несущую раму посевного агрегата, которая начинает совершать колебания относительно приводного колеса в зоне рабочих органов. При этом рабочие органы, расположенные в несколько

рядов на разном расстоянии относительно этого колеса, начинают изменять глубину обработки в зависимости от текущего положения несущей рамы. Поэтому для компенсации указанных колебаний целесообразно использовать активную систему управления навесным устройством, позволяющую регулировать положение оси подвеса сеялки относительно поверхности почвы.

Структурная схема электрогидравлической системы управления рабочими органами изображена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема электрогидравлической системы управления рабочими органами

Электрогидравлическая система управления навесным устройством содержит насос с приводным двигателем, электрогидравлический регулятор, гидроцилиндр, кинематически соединенный посредством силовой проводки с рабочим органом, а также контроллер.

Задающее воздействие в виде электрического сигнала, величина которого задается оператором, и сигнал обратной связи поступают в контроллер и полученный в результате их обработки управляющий сигнал подается на обмотки электромагнитов регулятора. Насос преобразует механическую энергию приводного двигателя в энергию потока жидкости, которая посредством указанного регулятора переходит через силовую проводку в энергию движения рабочего органа для коррекции его положения.

Блок-схема электрогидравлической системы высотного регулирования положения рабочих органов [7] изображена на рисунке 2.

Кинематическое возмущение  $X_0$  со стороны поверхности поля и исполнительное перемещение гидроцилиндра  $X_A$  соответственно через коэффициенты передач  $K_2$  и  $K_1$  определяют высоту  $h$ , измеряемую с использованием акустических средств с выходным сигналом  $U_h$ . Этот сигнал обратной связи сравнивается с задающим воздействием  $W$ , что определяет рассогласование  $e(t)$  в системе регулирования.

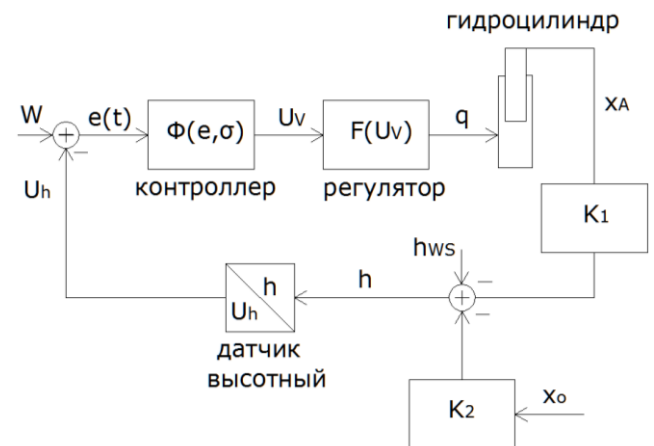


Рисунок 2 – Блок-схема электрогидравлической системы высотного регулирования положения рабочих органов

Контроллер согласно оператору  $\Phi(e, \sigma)$  на основе соответствующего алгоритма формирует управляющее воздействие  $U_v$ . Электрогидравлический регулятор с передаточной функцией  $F(U_v)$  реализует коррекцию положения штока гидроцилиндра посредством потока рабочей жидкости  $q$ .

Схема динамической системы для составления математического описания процесса функционирования электрогидравлической системы высотного регулирования положения рабочих органов отображена на рисунке 3.

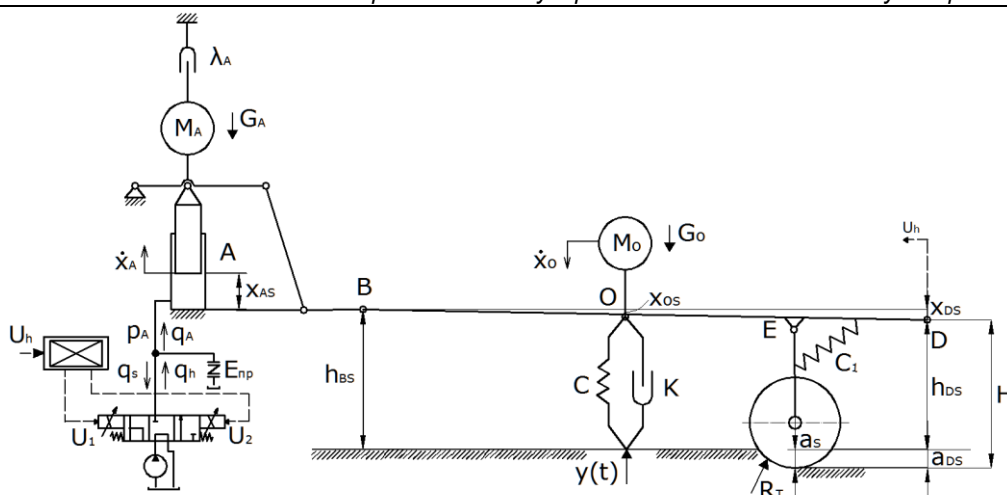


Рисунок 3 – Схема динамической системы электрогидравлической системы высотного регулирования положения рабочих органов

Указанная схема отражает принцип высотного позиционирования рабочих органов посевного агрегата без опорного колеса в районе соединительного устройства. На схеме отражены кинематические связи, весовые нагрузки, диссипативные и конструкционные параметры, а также перемещения характерных точек остова при его смещении из исходного положения в равновесное, или статическое (индекс «S»). Согласно приведенному рисунку точка B соединительного устройства расположена в установившемся состоянии на высоте  $h_{BS}$  при горизонтальном положении нижних тяг трактора, сосредоточенные массы обозначены  $M_O, M_A$  с векторами их перемещений  $dx_O/dt$  и  $dx_A/dt$ , коэффициент вязкого трения –  $\lambda_A$ , весовые нагрузки –  $G_O$  и  $G_A$ . При этом опора в точке O взаимодействует с рельефом поля, характеризующимся кинематическим возмущением  $y(t)$ , посредством звеньев с обобщенными жесткостью C и коэффициентом диссипации K резиновых шин. Рабочий орган с пружиной, имеющей жесткость  $C_1$ , на который действует сила сопротивления  $R_T$  со стороны почвы, расположен в установившемся состоянии в точке E на глубине  $a_S$ . Датчик измерения высоты  $h_{DS}$  расположен в точке D.

На неравномерность глубины заделки семян существенное влияние оказывает устойчивость хода сошника по глубине, которая обусловлена величиной действующих на него сил. Для определения коэффициента передачи рычажного механизма  $k_Z$ , как отношения хода сошника к деформации пружины, выполнен кинестатический анализ сошниковой группы (рисунок 4).

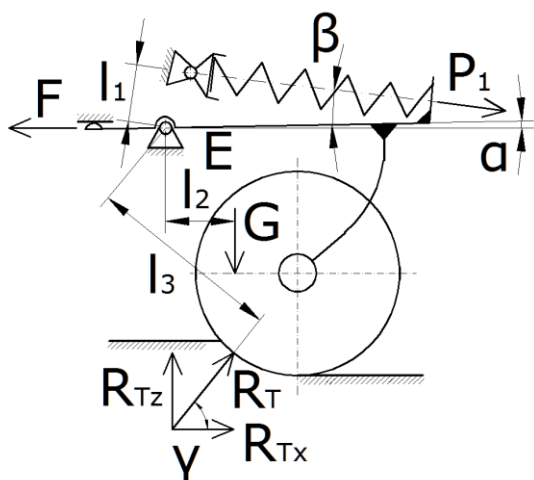


Рисунок 4 – Схема сил, действующих на дисковый сошник

Система уравнений, описывающая статическое равновесие элементов сошниковой группы, имеет вид:

$$\begin{cases} -P_1 \cos(\alpha + \beta) - F \cos \alpha + R_T \cos \gamma = 0; \\ -P_1 \sin(\alpha + \beta) - F \sin \alpha - G + R_T \sin \gamma = 0; \\ -P_1 l_1 - G l_2 + R_T l_3 = 0, \end{cases}$$

где  $P_1$  – величина предварительного поджатия пружины сошника;  
 $F$  – сила тяги сошника;  
 $G$  – вес сошника;  
 $l_1, l_2$  и  $l_3$  – плечи действия соответствующих сил относительно оси подвеса.

Из приведенной системы уравнений определяются усилия  $F$  и  $P_1$ . При составлении математического описания приняты следующие допущения: динамический процесс происходит в окрестностях установившегося движения привода при среднем положении поршня в гидроцилиндре; волновые процессы в гидравлических магистралях из-за их малой длины не влияют на динамику привода; модуль упругости рабочей жидкости является постоянной величиной, которая не зависит от давления и температуры; нерастворенный воздух в жидкости отсутствует; коэффициенты вязкости жидкости и расхода управляемых дросселей являются постоянными величинами; гидравлические потери в трубопроводах и каналах малы, поэтому ими можно пренебречь [9].

В расчетах приняты следующие основные и производные размерности физических величин: масса, кг; перемещение и линейные размеры, м; время, с; скорость, м/с; поток, м<sup>3</sup>/с; усилие, Н; напряжение, В; ток, А; активное сопротивление, Ом; давление и модуль упругости рабочей жидкости, Па; объем, м<sup>3</sup>; коэффициент вязкого трения кг/с и жесткость Н/м.

Процесс функционирования указанной системы описывается дифференциальными уравнениями первого и второго порядка или уравнениями равновесия для активных и инерционных сил, а также реакцией связи, а неразрывность циркулирующей рабочей жидкости при этом выражена уравнениями баланса расходов [7].

Активная площадь  $A$  и объем полости  $V_A$  обобщенного силового гидроцилиндра электрогидравлического привода с учетом длины напорной магистрали определяются из следующих соотношений:

$$A = 2 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \text{ и } V_A = 1,2A \cdot x_{A \max},$$

где  $D$  – диаметр штока.

Приведенные к штоку силового гидроцилиндра навесного устройства масса  $M_B$  и весовая нагрузка  $G_B$  согласно условиям равновесия механической системы и баланса кинетической энергии соответствуют следующим произведениям:

$$M_A = k_G^2 M_B \text{ и } G_A = k_G G_B,$$

где  $k_G$  – коэффициент передачи навесного устройства.

Давление рабочей жидкости в силовом гидроцилиндре в установленном режиме выразим через его конструкционные параметры:

$$p_{AS} = \frac{G_A}{A}.$$

Обобщенная жесткость опоры в точке  $O$  соответствует формуле:

$$C = \frac{R_{BS}}{x_{OS}},$$

где  $x_{OS}$  – смещение точки  $O$  остова из исходного в равновесное, или статическое положение, причем указанное смещение определяется графоаналитическим методом.

Изменение токов  $i_1$  и  $i_2$  в обмотках электромагнитов подъема и опускания регулятора с начальными условиями  $i_1(0) = 0$ ,  $di_1/dt(0) = 0$  и  $i_2(0) = 0$ ,  $di_2/dt(0) = 0$  описываются следующими уравнениями:

$$\frac{T di_1}{dt} + i_1 = \frac{U_1}{R};$$

$$\frac{T di_2}{dt} + i_2 = \frac{U_2}{R},$$

где  $T$  и  $R$  – постоянная времени и активное сопротивление обмотки электромагнита;

$U_1$  и  $U_2$  – управляющие сигналы для электромагнитов подъема и опускания.

Управляющие воздействия со стороны электрогидравлического регулятора при перемещении навесного устройства в сторону подъема  $q_A$  и опускания  $q_S$  определяются выражениями:

$$q_A = k_q i_1 \text{ и } q_S = k_q i_2,$$

где  $k_q$  – коэффициент передачи электрогидравлического регулятора.

Баланс потоков рабочей жидкости в узле напорной линии гидросистемы привода с учетом приведенных выше выражений имеет вид:

$$k_q i_1 - k_q i_2 - A \frac{dx_A}{dt} - \frac{V_A}{E_{np}} \frac{dp_A}{dt} = 0$$

с начальными условиями  $p_A(0) = 0$ ,  $dp_A/dt(0) = 0$ , причем  $k_q i_{1max} = k_q i_{2max} = Q$ .

Производная давления в указанном узле равна:

$$\frac{dp_A}{dt} = \frac{E_{np}}{V_A} \left( k_q i_1 - k_q i_2 - A \frac{dx_A}{dt} \right).$$

Движение штока силового гидроцилиндра с приведенными массой и весовой нагрузкой в условиях вязкого трения описывается дифференциальным уравнением:

$$M_A \frac{d^2 x_A}{dt^2} = p_A A - \lambda_A \frac{dx_A}{dt} - G_A$$

с начальными условиями  $x_A(0) = x_{AS}$ ,  $dx_A/dt(0) = 0$ .

Приведенное ниже дифференциальное уравнение описывает колебания точки  $O$  остова сельхозмашины с приведенными массой

и весовой нагрузкой в условиях его базирования на резиновых шинах согласно упруго-вязкой модели [7]:

$$M_O \frac{d^2 x_O}{dt^2} = C(y - x_O) + K \left( \frac{dy}{dt} - \frac{dx_O}{dt} \right) + G_O$$

с начальными условиями  $x_O(0) = x_{OS}$ ,  $dx_O/dt(0) = 0$ .

Глубина обработки почвы, соответствующая расположению сошника (точка  $E$ ), определяется отношением:

$$a = \frac{H - h_D}{k_{DE}},$$

где  $H$  – конструкционный параметр;

$h_D$  – высота расположения датчика;

$k_{DE}$  коэффициент передачи.

Приведенное ниже дифференциальное уравнение описывает движение пружины сошника:

$$M_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} = k_c R_T - C_1 x_d - K_1 \frac{dx_d}{dt} - P_1,$$

где  $k_c$  – коэффициент пропорциональности;

$R_T$  – усилие сопротивления почвы;

$M_d$  – масса сошника;

$C_1$  – жесткость пружины;

$K_1$  – коэффициент вязкого трения;

$P_1$  – усилие предварительного поджатия пружины.

Выражение для усилия сопротивления почвы согласно рациональной формуле В. П. Горячкина имеет вид:

$$R_T = fG + kabn + \varepsilon abV^2, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент пропорциональности, аналогичный коэффициенту трения;

$k$  – коэффициент удельного сопротивления почвы;  $a$  – глубина обработки почвы;

$b$  – ширина захвата;

$n$  – количество почвообрабатывающих органов;

$\varepsilon$  – коэффициент скоростного сопротивления;

$V$  – скорость движения агрегата.

Численное интегрирование дифференциальных уравнений осуществлено методом Рунге-Кутты второго порядка, а программирование выполнено на соответствующем языке в среде *MatLab* с возможностью графического отображения результатов моделирования.

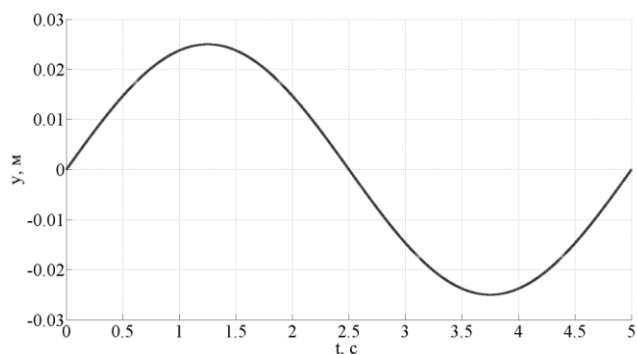
Величину и скорость изменения кинематического возмущающего воздействия со стороны почвы можно описать гармоническим законом:

$$y(t) = A_y \sin \frac{2\pi}{T_y} t \text{ и } dy/dt = A_y \frac{2\pi}{T_y} \cos \frac{2\pi}{T_y} t, \quad (2)$$

где  $A_y$ ,  $T_y$  – амплитуда и период кинематического возмущающего воздействия.

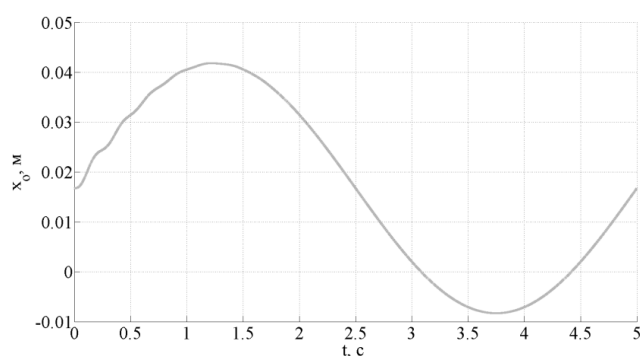
Ниже приведены исходные данные, использованные при вычислительных реализациях компьютерной модели:  $D = 0,09$  м;  $X_{Amax} = 0,2$  м;  $k_G = 3,2$ ;  $G_B = 120540$  Н;  $M_B = 12300$  кг;  $C = 6,5 \cdot 10^6$  Н/м;  $T = 0,04$  с;  $R = 1,7$  Ом;  $U_{max} = 5,1$ ;  $k_q = 3,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/(с·А);  $V_A = 3,8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>;  $E_{np} = 0,7 \cdot 10^9$  Па;  $p_{AS} = 2,92 \cdot 10^6$  Па;  $\lambda_A = 20000$  кг/с;  $M_O = 10048$  кг;  $G_O = 108950$  Н;  $K = 50000$  кг/с;  $H = 0,6248$  м;  $h_D = 0,5735$  м;  $k_{DE} = 1,026$ ;  $x_O = 0,0168$  м;  $M_d = 7,6$  кг;  $k_c = 3,79$ ;  $C_1 = 63950$  Н/м;  $K_1 = 8500$  кг/с;  $k_Z = 3,24$ ;  $P_1 = 116$  Н;  $f = 0,4$ ;  $k = 38000$  Па;  $b = 0,8$  м;  $n = 48$ ;  $\varepsilon = 39456$  Н·с<sup>2</sup>·м<sup>-4</sup>;  $V = 5$  м/с.

На рисунке 5 изображен входной сигнал при гармоническом законе изменения возмущающих воздействий в случае вертикального перемещения опорно-приводных колес с резиновыми шинами.



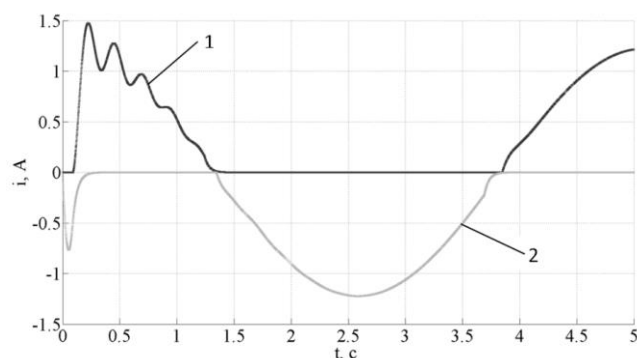
**Рисунок 5** – Кинематическое возмущение на входе динамической системы

Графическая зависимость, которая отражает характер протекания колебательного процесса приведенной массы  $M_0$  остова машины с учетом обобщенных жесткости  $C$  и коэффициента диссипации  $K$  резиновых шин при указанных возмущающих воздействиях, представлена на рисунке 6.



**Рисунок 6** – Перемещение остова посевного агрегата

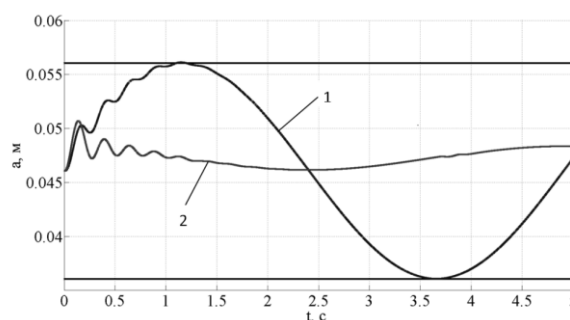
На рисунке 7 показаны процессы изменения токов управления в обмотках электромагнитов регулятора.



**Рисунок 7** – Изменение токов управления электромагнитов подъема (1) и опускания (2) регулятора навесного устройства

Анализ приведенных зависимостей указывает на периодический характер управляющего сигнала, имеющего предельное нарастание амплитуды токов управления в обмотках электромагнитов подъема и опускания регулятора 1,5 А и 1,25 А соответственно.

Изменение глубины обработки почвы в случае замкнутой и разомкнутой систем управления при кинематическом гармоническом возмущающем воздействии, соответствующем выражению (1), с амплитудой  $A_y = 0,025$  м и постоянной скорости движения посевного агрегата  $V = 5$  м/с показано на рисунке 8.



1 и 2 – разомкнутая и замкнутая системы управления соответственно

**Рисунок 8** – Изменение глубины обработки почвы

В таблице 1 приведены результаты теоретических исследований влияния структуры системы на статистические оценки качества обработки почвы при кинематическом гармоническом возмущающем воздействии.

Статистические показатели указанного процесса вычислены по известным формулам [7]:

$$\bar{a} = \frac{\sum a}{n}, \sigma = \sqrt{\frac{\sum (a - \bar{a})^2}{n}}, V_\sigma = \frac{\sigma}{\bar{a}} 100 \%,$$

где  $\bar{a}$  и  $n$  – среднее значение и количество измерений глубины обработки почвы;

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;

$V_\sigma$  – коэффициент вариации.

**Таблица 1** – Неравномерность глубины обработки почвы

Структура системы управления	$\sigma$ , м	$V_\sigma$ , %	$[V_\sigma]$ , %
Разомкнутая	0,007	15,3	15
Замкнутая	0,0015	3,3	

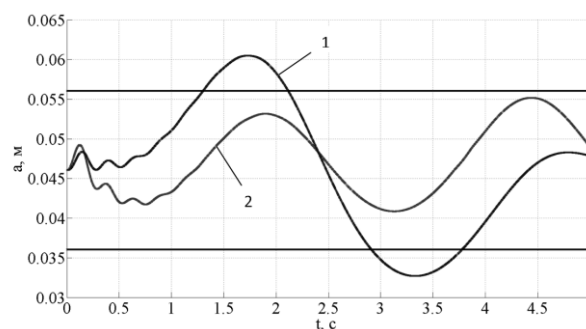
Сравнительный анализ приведенных в таблице результатов показывает, что агротехнические требования к глубине заделки семян выполняются при функционировании замкнутой системы, которая позволяет уменьшить коэффициент вариации глубины обработки в сравнении с разомкнутой системой на 12 %.

Величина изменения возмущающего воздействия по скорости движения посевного агрегата, описанная гармоническим законом, имеет вид:

$$V(t) = V_0 + A_V \sin \frac{2\pi}{T_V} t, \quad (3)$$

где  $A_V$ ,  $T_V$  – амплитуда и период скоростного возмущающего воздействия.

Изменение глубины обработки почвы в случае замкнутой и разомкнутой систем управления при кинематическом и скоростном гармонических возмущающих воздействиях, описанных выражениями (2) и (3), с амплитудами соответственно  $A_y = 0,025$  м и  $A_V = 0,5$  м/с представлено на рисунке 9.



1 и 2 – разомкнутая и замкнутая системы управления соответственно

**Рисунок 9** – Изменение глубины обработки почвы



В таблице 2 приведены результаты теоретических исследований влияния структуры системы на статистические оценки качества обработки почвы при указанных кинематическом и скоростном гармонических возмущающих воздействиях.

**Таблица 2 – Неравномерность глубины обработки почвы**

Структура системы управления	$\sigma$ , м	$V_{\sigma}$ , %	$[V_{\sigma}]$ , %
Разомкнутая	0,0083	17,9	15
Замкнутая	0,005	10,4	

Приведенные в таблице 2 результаты показывают, что изменение гармонических кинематических возмущающих воздействий со стороны почвы с амплитудой  $A_y = 0,025$  м и скорости движения посевного агрегата в пределах  $V = 4,5...5,5$  м/с вызывает снижение качества посева, т. к. разомкнутая система с подпружиненными сошниками не удовлетворяет агротехническим требованиям к глубине заделки семян.

Использование замкнутой системы управления обеспечивает соблюдение указанных требований при уменьшении коэффициента вариации глубины обработки почвы  $V_{\sigma}$  на 7,5 %, однако его величина возрастает на 7,1 % в сравнении с результатами, полученными при постоянной скорости движения посевного агрегата и аналогичными кинематическими возмущениями (см. табл.1). Это объясняется тем, что при изменении скорости движения агрегата происходит девиация усилия тягового сопротивления согласно выражению (1), что вызывает колебания подпружиненного сошника.

**Заключение**

1. В условиях кинематических гармонических возмущений от рельефа поверхности остов посевного агрегата совершает колебания, которые при отсутствии опорных колес со стороны соединительного звена влияют на точность позиционирования подпружиненных сошников. Активный контур высотного регулирования в составе замкнутой системы управления, содержащий в цепи обратной связи выходной сигнал датчика измерения высоты рамы сеялки, компенсирует отсутствие базирования на опорных колесах и позволяет удовлетворить агротехническим требованиям к глубине заделки семян при уменьшении коэффициента вариации в сравнении с разомкнутой системой на 12 %.
2. При возникновении возмущений от гармонического изменения скорости посевного агрегата возникают дополнительные колебания подпружиненных сошников вследствие изменения усилия сопротивления почвы, что приводит к снижению точности обработки почвы при посеве разомкнутой системой управления и несоблюдению агротехнических требований. Функционирование замкнутой системы управления в этом случае обеспечивает соблюдение указанных требований при уменьшении коэффициента вариации глубины обработки почвы на 7,5 %.

**Список цитированных источников**

1. Агрегат почвообрабатывающе-посевной АППМ-6 [Электронный ресурс] // ОАО "Брестский электромеханический завод". – Режим доступа: <http://www.bemzbrest.by/ru/katalog/selskoxozyajstvennaya-texnika/139-agregat-posevnoj-appm-6.html>. – Дата доступа: 25.03.2021.
2. Сошники индивидуального копирования Class [Электронный ресурс] // АГРОКАРАВАН. – Режим доступа: <http://www.bemzbrest.by/ru/katalog/selskoxozyajstvennaya-texnika/139-agregat-posevnoj-appm-6.html>. – Дата доступа: 25.03.2021.
3. Компании PÖTTINGER = Эффективный посев. Высокопроизводительные прицепные сеялки по мульче с рабочей шириной от 3 до 9 м. – [Б. м. : б. и., б. г.]. – 32 с.
4. Скорость посева зерновых культур [Электронный ресурс] // Direct.Farm. – Режим доступа: <https://direct.farm/post/5493>. – Дата доступа: 25.03.2021.
5. Непарко, Т.А. Техническое обеспечение процессов в растениеводстве : в 6 т. / Т. А. Непарко, А. В. Новиков, В. Я. Тимошенко. – Минск : БГАТУ, 2012. – Ч. 3. : лабораторный практикум. – 72 с.
6. Корф, Д. В. Преобразование сеялки / Д. В. Корф // Агро Бизнес – 2016. – № 6. – С. 134–139.

7. Савчук, С. В. Повышение качества функционирования электрогидравлического привода рабочих органов мобильных машин при бесконтактном копировании рельефа поверхности : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.02.02 / С. В. Савчук ; Обьединенный институт машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2019. – 21 с.
8. Бесконтактное копирование рельефа поверхности поля рабочими органами сельхозмашин с использованием акустических методов / Е. Я. Строк [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 6. – С. 35–39.
9. Гамынин, Н. С. Гидравлический привод систем управления / Н. С. Гамынин. – М. : Машиностроение, 1972. – 376 с.

**References**

1. Agregat pochvoobrabatyvayushche-posevnoj APPM-6 [Elektronnyj resurs] // ОАО "Brestskij elektromekhanicheskij zavod". – Rezhim dostupa: <http://www.bemzbrest.by/ru/katalog/selskoxozyajstvennaya-texnika/139-agregat-posevnoj-appm-6.html>. – Data dostupa: 25.03.2021.
2. Soshniki individual'nogo kopirovaniya Class [Elektronnyj resurs] // AGROKARAVAN. – Rezhim dostupa: <http://www.bemzbrest.by/ru/katalog/selskoxozyajstvennaya-texnika/139-agregat-posevnoj-appm-6.html>. – Data dostupa: 25.03.2021.
3. Kompanii PÖTTINGER = Effektivnyj posev. Vysokoproizvo-ditel'nye pricepnye seyalki po mul'che s rabochej shirinoy ot 3 do 9 m. – [B. m. : b. i., b. g.]. – 32 s.
4. Skorost' poseva zemnykh kul'tur [Elektronnyj resurs] // Direct.Farm. – Rezhim dostupa: <https://direct.farm/post/5493>. – Data dostupa: 25.03.2021.
5. Neparco, T. A. Tekhnicheskoe obespechenie processov v rastenievodstve : v 6 t. / T. A. Neparco, A. V. Novikov, V. YA. Timoshenko. – Minsk : BGATU, 2012. – CH. 3. : laboratornyj praktikum. – 72 s.
6. Korf, D. V. Preobrazovanie seyalki / D. V. Korf // Agro Biznes – 2016. – № 6. – S. 134–139.
7. Savchuk, S. V. Povyshenie kachestva funkcionirovaniya elektro-gidravlicheskogo privoda rabochih organov mobil'nyh mashin pri beskontaktnom kopirovanii rel'efa poverhnosti : avto-ref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.02 / S. V. Savchuk ; Ob"edinennyj institut mashinostroeniya NAN Belarusi. – Minsk, 2019. – 21 s.
8. Beskontaktnoe kopirovanie rel'efa poverhnosti polya rabochimi organami sel'hozmashin s ispol'zovaniem akusticheskikh metodov / E. YA. Strok [i dr.] // Traktory i sel'hozmashiny. – 2012. – № 6. – S. 35–39.
9. Gamyнин, N. S. Gidravlicheskiy privod sistem upravleniya / N. S. Gamyнин. – M. : Mashinostroenie, 1972. – 376 s.

Материал поступил в редакцию 12.01.2022