

УДК 681.523 (075.8)

Е.Я.Строк, Л.Д.Бельчик, кандидаты технических наук

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г.Минск, Республика Беларусь

Разработка алгоритма управления навесным устройством зерноуборочного комбайна с использованием математического моделирования

В статье рассмотрены вопросы компьютерного моделирования системы автоматического копирования рельефа поля с целью разработки ее алгоритма управления. Полученные параметры алгоритма позволяют создать систему автоматического копирования рельефа поверхности поля, соответствующую конструктивным и эксплуатационным показателям высокого технического уровня.
алгоритм управления, продольное и поперечное копирование, компьютерное моделирование

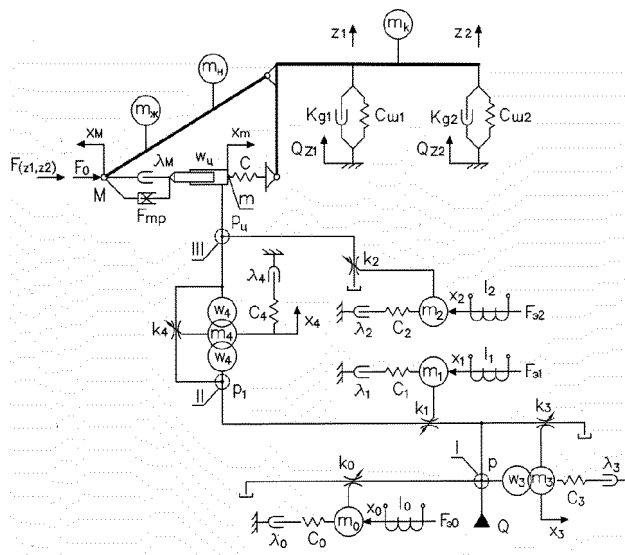
Эффективность выполняемых зерноуборочных операций в основном определяется точностью копирования рельефа поля жаткой комбайна. С этим связано уменьшение потерь урожая и увеличение производительности зерноуборочной техники. Для получения необходимых показателей качества работы комбайна, обеспечивающего поддержание высоты среза скашиваемых культур на заданном уровне, большое значение имеет определение структуры и параметров алгоритма функционирования, а также рациональных конструкционных параметров системы автоматического копирования рельефа поля. При этом целесообразно использовать математическое моделирование, позволяющее проводить абстрактный синтез системы управления с учетом структурных параметров и динамических свойств.

Копирование микрорельефа поля жаткой комбайна представляет собой колебательный процесс. Основным источником низкочастотных колебаний комбайна являются неровности почвы. При скорости комбайна до 8 км/ч и воздействии значительных инерционных нагрузок эти неровности могут вызвать колебания жатки с частотой до 1 Гц, что ухудшает точность копирования [1].

Электрогидравлические системы управления содержат существенно нелинейные элементы, например, сухое трение в гидроцилиндрах, перекрытие на управляющих кромках золотников, предварительное поджатие возвратных пружин, зону нечувствительности, гистерезис, насыщение по электрическому току и гидравлическому потоку, квадратичную зависимость между расходом и перепадом давления и т. д. Поэтому при составлении математического описания динамической системы копирования приняты следующие допущения: волновые процессы в гидравлических магистралях не влияют на динамику привода; модуль упругости рабочей жидкости является постоянной величиной, которая не зависит от давления и температуры; нерастворенный воздух в жидкости отсутствует; коэффициент вязкости жидкости и коэффициенты расхода управляемых дросселей распределителя являются постоянными величинами; гидравлические потери в трубопроводах между распределителем, силовым гидроцилиндром и насосом не учитываются.

Работа гидропривода системы копирования рельефа поля описывается двумя типами уравнений, которые соответствуют физическим явлениям в этой системе.

На рисунке 1 показана схема динамической системы.



Масса, приведенная к штоку гидроцилиндра, определяется по формуле

где $m_{жк}$, m_n и $m_{шт}$ - массы наклонной камеры, жатки и штока гидроцилиндра, кг; K_{G1M} и K_{G2M} - коэффициенты передач.

$$F_0 = G_1 K_{G_1 M} + G_2 K_{G_2 M} . \quad (2)$$
$$q - k_1 \sqrt{p - p_1} - k_2 \sqrt{p_y} - \sqrt{p} (k_3 + k_0) - \frac{V_{T1}}{E_1} \frac{dp}{dt} = 0, \quad (3)$$
$$k_0 = \mu_2 \pi d_0 (X - x_0) \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho}}; \quad k_1 = \mu_1 \pi d_1 x_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}};$$

$$k_2 = \mu_2 \pi d_2 x_2 \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho}}; \quad k_3 = \mu_2 \pi d_3 x_3 \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho}},$$

где q – подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$;
 k_1 , k_2 , k_3 и k_0 – проводимости впускного золотника, выпускного и переливного клапанов, а также клапана блокировки циркуляции соответственно, $\text{м}^4/\text{с}/\text{Н}^{1/2}$;
 p и p_1 – соответственно давления в напорном трубопроводе насоса и полости распределителя между впускным дросселем и обратным клапаном, Па;
 V_{T1} – объем напорного трубопровода насоса, м^3 ;
 E_1 – приведенный модуль объемной упругости рабочей жидкости для насосного трубопровода, Па;
 μ_1 и μ_2 – коэффициенты расхода золотника и клапана;
 d_0 , d_1 , d_2 и d_3 – диаметры клапана блокировки циркуляции, впускного золотника, выпускного и переливного клапанов соответственно, м;
 X – величина открытия клапана в режиме циркуляции жидкости на слив, м;
 x_0 , x_1 , x_2 и x_3 – перемещения соответствующих золотников и клапанов, м;
 ρ – плотность рабочей жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 α – угол при вершине затвора клапана, рад.
Уравнение баланса расходов для узла II имеет вид

$$k_1\sqrt{p-p_1}-k_4\sqrt{p_1-p_u}-\frac{V_{T2}}{E_1}\frac{dp_1}{dt}=0, \quad (4)$$

причем

$$k_4=\mu_2\pi d_4x_4\sin\frac{\alpha}{2}\sqrt{\frac{2}{\rho}},$$

где k_4 – проводимость обратного клапана, $\text{м}^4/\text{с}/\text{Н}^{1/2}$;
 V_{T2} – объем в полости распределителя между впускным золотником и обратным клапаном, м^3 ;
 d_4 и x_4 – диаметр и перемещение обратного клапана, м.
Баланс расходов для узла III определяется по выражению

$$k_4\sqrt{p_1-p_u}-3\omega_u\left(\frac{dx_M}{dt}+\frac{dx_m}{dt}\right)-k_2\sqrt{p_u}-3\frac{V_u}{2E_2}\frac{dp_u}{dt}=0, \quad (5)$$

где x_M – координата штока (точка М) гидроцилиндра, м;
 x_m – координата корпуса (точка m) гидроцилиндра, м;
 V_u – объем гидроцилиндра, м^3 ;
 E_2 – приведенный модуль объемной упругости рабочей жидкости для гидроцилиндра, Па.

Комбайн с жаткой в режиме колебаний в продольно-вертикальной плоскости можно заменить эквивалентной трехмассовой системой, движение которой описывается дифференциальными уравнениями. Путем интегрирования указанных уравнений определяются обобщенные координаты z_1 и z_2 – вертикальные перемещения осей соответственно передних и задних колес комбайна.

Осевое перемещение штока гидроцилиндра x_M в точке подсоединения к жатке определяется из уравнения

$$M \frac{d^2 x_M}{dt^2} = 3\omega_{\psi} \delta p_{\psi} - \lambda_M \frac{dx_M}{dt} - (F_{CTP} - r \frac{dx_M}{dt}) \text{sign} \frac{dx_M}{dt} - F_d, \quad (6)$$

где δp_{ψ} – отклонение величины давления в гидроцилиндре от равновесного значения, Па;

M – приведенная масса, кг;

F_{CTP} – сила страгивания, Н;

r – коэффициент, характеризующий уменьшение силы трения при возрастании скорости, Н·с/м;

λ_M – параметр затухания, Н·с/м;

$\text{sign} \frac{dx_M}{dt} = \frac{dx_M}{dt} / \left| \frac{dx_M}{dt} \right|$ – функция Кронекера.

Для корпуса гидроцилиндра с учетом податливости его основания можно записать уравнение движения

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} = \omega_{\psi} \delta p_{\psi} - c x_m - \lambda_m \frac{dx_m}{dt}, \quad (7)$$

где m – масса корпуса гидроцилиндра, кг;

λ_m – параметр затухания, Н·с/м.

Высота среза определяется по выражению

$$H_F = H_{F0} + K_{z_1 F} z_1 - K_{z_2 F} z_2 + K_{MF} x_M - Q_F, \quad (8)$$

причем

$$H_{F0} = K_{z_1 F} z_{10} - K_{z_2 F} z_{20},$$

где H_{F0} – начальная (заданная) высота среза, м;

$K_{z_1 F}$ и $K_{z_2 F}$ – коэффициенты передач от возмущений по перемещениям переднего и заднего мостов к точке F ;

K_{MF} – коэффициент передачи по перемещению штока гидроцилиндра к точке F .

Величину ошибки копирования можно вычислить как разность

$$\delta H_F = H_F - H_{F0}. \quad (9)$$

Результирующее возмущение, приведенное в точку F (зона среза),

$$\sum H = K_{z_1 F} z_1 - K_{z_2 F} z_2 - Q_F. \quad (10)$$

Процесс нарастания тока в обмотке электромагнита постоянного тока описывается дифференциальным уравнением первого порядка

$$T_{\psi} \frac{di}{dt} + i = \frac{U}{R}, \quad (11)$$

где T_{ψ} – постоянная времени изменения тока, с;

U – напряжение (управляющее воздействие), В;

R – сопротивление обмотки, Ом.

Решение уравнения (11) относительно тока имеет вид

$$i = \frac{U}{R}(1 - e^{-t/T_{\text{Э}}}). \quad (12)$$

Усилие, развиваемое электромагнитом,

$$F_{\text{Э}} = k_{\text{Э}} i, \quad (13)$$

где $k_{\text{Э}}$ – коэффициент преобразования, Н/А.

Перемещения клапана блокировки циркуляции рабочей жидкости, впускного золотника и выпускного клапана описываются дифференциальным уравнением

$$(m_i + m_{\text{я}}) \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_{\text{Э}} - \lambda \frac{dx_i}{dt} - c_i x_i - N_i, \quad (14)$$

где m_i и $m_{\text{я}}$ – массы соответствующего распределительного элемента и якоря электромагнита, кг;

λ – коэффициент вязкого трения, Н·с/м;

c_i и N_i – жесткость, Н/м и усилие предварительного поджатия возвратной пружины соответствующего распределительного элемента, Н.

Перемещение переливного клапана описывается дифференциальным уравнением

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = \omega_3 p - \lambda \frac{dx_3}{dt} - c_3 x_3 - N_3, \quad (15)$$

где m_3 – масса клапана, кг;

c_3 и N_3 – соответственно жесткость, Н/м и усилие предварительного поджатия возвратной пружины, Н.

Уравнение, описывающее перемещение обратного клапана, имеет вид

$$m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} = \omega_4 (p_1 - p_u) - \lambda \frac{dx_4}{dt} - c_4 x_4 - N_4, \quad (16)$$

где m_4 и ω_4 – соответственно масса, кг и активная площадь затвора, м²;

c_4 и N_4 – соответственно жесткость, Н/м и усилие предварительного поджатия возвратной пружины, Н.

Выходной сигнал датчика определяется выражением

$$U_{\text{Д}} = k_{\text{Д}} H_{\text{Ф}}, \quad (17)$$

где $k_{\text{Д}}$ – коэффициент передачи датчика, В/м.

Интегрирование вышеприведенных уравнений в среде программирования С++ позволяет определить изменение высоты среза $H_{\text{Ф}}$ жатки при наличии обратной связи в условиях свободных и вынужденных колебаний.

Математическое описание работы контура поперечного копирования проводится аналогично вышеприведенному.

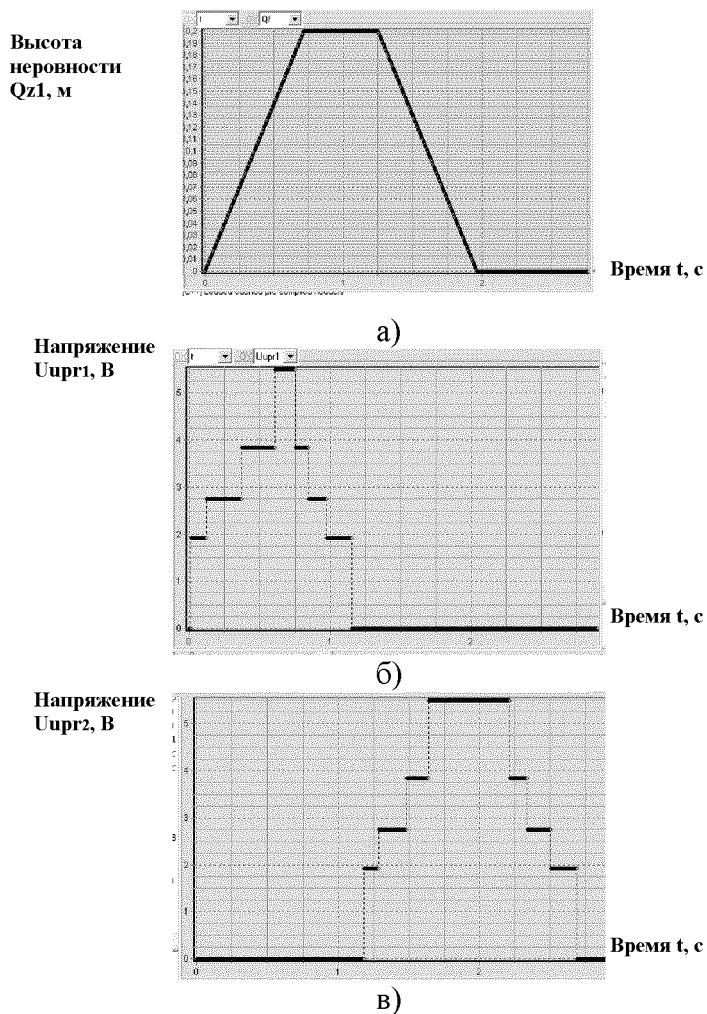
С использованием математической модели разработан алгоритм управления для системы автоматического копирования рельефа поля. Вследствие того, что управляющее воздействие в релейной системе по абсолютной величине всегда максимально, при определенных условиях можно получить оптимальный процесс,

характеризующийся минимальным временем установления и отсутствием перерегулирования.

Алгоритм управления при продольном копировании предусматривает использование следующих принципов: определение управляющего сигнала в виде Р-закона; формирование управляющего воздействия посредством четырехуровневого релейного напряжения с зоной нечувствительности и положительным гистерезисом.

Целью управления процессом поперечного копирования является минимизация разности выходных сигналов правого и левого датчиков положения жатки согласно алгоритму управления, который предусматривает: определение рассогласования в виде разности выходных сигналов датчиков со стороны левого и правого копиров и формирование управляющего сигнала согласно Р-закону; формирование управляющего воздействия релейного вида с зоной нечувствительности и положительным гистерезисом.

Реализации компьютерной модели с разработанным алгоритмом управления показывают высокое качество копирования выбранной неровности (рисунок 2).



а–профиль заданной неровности; б,в – напряжения на обмотках электромагнитов подъема и опускания соответственно

Рисунок 2 – Реализации компьютерной модели контура продольного копирования при наезде датчиками на неровность с профилем в виде трапеции (скорость движения комбайна 2 км/ч)

Использование метода компьютерного моделирования позволяет определить параметры алгоритма управления, провести оценку устойчивости и качества

копирования рельефа поля. Это дает возможность создать с наименьшими затратами систему автоматического копирования рельефа поверхности для мобильных машин, соответствующую по совокупности конструкционных и эксплуатационных показателей более высокому техническому уровню.

Список литературы

1. Алферов С.А., Калошин А.И., Угаров А.Д. Как работает зерноуборочный комбайн.- М.: Машиностроение, 1981. – 190 с.
2. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.: ДизайнПРО, 1997. – 640 с.

Е. Строк, Л. Бельчик

Розробка алгоритму управління навісним пристроєм зернозбирального комбайна із використанням математичного моделювання

В статті розглянуті питання комп'ютерного моделювання системи автоматичного копіювання рельєфу поля з метою розробки її алгоритму управління. Одержані параметри алгоритму дозволяють створити систему автоматичного копіювання рельєфу поверхні поля, яка відповідає конструктивним та експлуатаційним показникам високого технічного рівня.

E. Strok, L. Belchik

Developing the control algorithm of the grain harvester hitch using mathematical modeling

The article considers issues of computer simulation of a system for automatic copying the field relief to develop its control algorithm. These algorithm options allow to create a field relief automatic control system, which corresponds to the high technical level design and performance characteristics.

Получено 12.09.09