

УДК 631.372

**МАНДРЫКА В.Р.**, к.т.н., доц., НТУ «ХПІ»

**МАНДРЫКА А.В.**, к.т.н., КП «ХКБМ им. А.А. Морозова»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ  
«ЧЕЛОВЕК-ОПЕРАТОР – МАШИНА С ОБЪЕМНЫМ ГИДРОПРИВОДОМ»**

Вивчення динаміки керування системи "ЛО - машина з об'ємним гідроприводом" при виконанні "підвороту" для розімкненої системи показало правильність прийнятої методики досліджень. Для замкнутої системи сигнал неузгодженості між базовою й реальною траєкторіями руху може бути прийнятий у вигляді випадкової величини. Ця величина є середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  між базовою й реальною траєкторіями руху. Визначена залежність відхилення  $\sigma$  від швидкості руху машини  $V$ . Установлено, що керуючі впливи ЛО при швидкості руху  $V=1\text{м/с}$  у часі можуть бути представлені у вигляді кусочно-лінійних залежностей з частотою від 0,25 до 0,5 Гц. Отримані дані можуть бути використані при проектуванні автоматів водіння для збиральних машин.

**Введение.** Обычно оценка управляемости самоходных машин при проведении теоретических исследований предполагает наличие ее математической модели. Однако при этом человеческий фактор, определяющий траекторию и скорость движения машины, не учитывается. При выполнении технологических операций по уборке сахарной свеклы человек – оператор (ЧО) в качестве входного возмущения направляет траекторию движения рабочих органов машины на траекторию рядков сахарной свеклы. Этот процесс сопровождается выбором скорости движения машины через закон воздействия на педаль бесступенчатого изменения передаточного числа объемного гидропривода, и законом воздействия на рулевое колесо. С одной стороны необходимо осуществлять движение с максимальной производительностью (максимально возможной скоростью), а с другой - уборка должна выполняться с минимальным повреждением убираемой продукции. Для этого рамка рабочих органов предусматривает наличие зазора, увеличение которого снижает скорость движения машины. Поэтому исследования, учитывающие не только характеристики машины, но и параметры ЧО, являются актуальными.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Известны методы определения математических моделей для исследования управляемости самоходных корнеуборочных машин с объемным гидроприводом на ход ведущих колес [1, 2]. Также известны методы построения математических моделей ЧО [3, 4]. Однако применение системного подхода для рассмотрения совместного действия системы «ЧО - машина» для решения подобной задачи не применялось.

**Цель и постановка задачи.** Целью исследования является изучение влияния скорости движения на динамику управления системы «ЧО - машина». Объектом исследования системы «ЧО - машина» являются ЧО, воздействующий через рулевое колесо на траекторию движения самоходной корнеуборочной машиной с объемным гидроприводом на ход, в процессе уборки сахарной свеклы. Кроме того, ЧО через педаль изменения передаточного числа объемного гидропривода может изменять бесступенчато скорость движения машины при выполнении технологических операций.

**Теоретические исследования.** Математическая модель ЧО, представляющая зависимость угла поворота рулевого колеса  $\phi_p$  от величины сигнала рассогласования  $\Delta$  базовой траектории  $\tau_6$  и траектории движения машины  $\tau$  представлена в виде апериодического звена второго порядка последовательно соединенного со звеном запаздывания (аппроксимация запаздывания рядом Падэ 1-го порядка) [3]. Математическая модель машины представлена апериодическим звеном второго порядка. Выходной сигнал  $\alpha_c$  является углом отклонения продольной оси машины от базовой траектории [2]. Структурная схема исследуемой системы «ЧО - машина» приведена на рисунке 1.

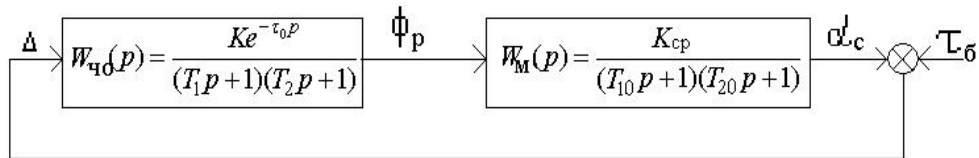


Рисунок 1 – Структурная схема системы «ЧО - машина»

Значения коэффициентов передачи и постоянных времени для приведенной математической модели системы «ЧО - машина», которые представлены в функции от средней скорости движения машины, имеют вид:

Для математической модели ЧО:	Для математической модели машины
$K = 0,3393 \cdot V + 0,6304$ ;	$K_{cp} = 0,094 \cdot V^2 - 0,647 \cdot V + 1,402$
$T_1 = 0,0208 \cdot V^2 - 0,0917 \cdot V + 0,1356$	$T_{10} = 0,169 \cdot V^2 - 1,658 \cdot V + 6,738$
$T_2 = 0,0042 \cdot V^2 - 0,023 \cdot V + 0,1356$ .	$T_{20} = 0,029 \cdot V^2 - 0,658 \cdot V + 4,852$ .

Разорвем обратную связь и рассмотрим переходные процессы, возникающие в системе. Моделирование выполняется с помощью пакета Mathcad. В качестве переменных в процессе расчетов кроме времени  $t$  принимаются различные скорости движения машины  $V$ . В качестве входного воздействия на рулевое колесо в этом случае рассматривается режим «поворот», когда ЧО для корректировки траектории движения поворачивает рулевое колесо на некоторый угол. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.

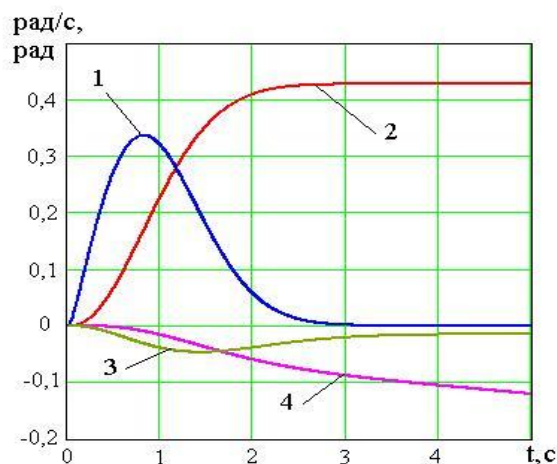


Рисунок 2 – Переходные процессы в системе «ЧО – машина», режим «поворот», при скорости движения машины 1,5 м/с, где 1 и 2 - скорость  $\omega_\phi$  и угол  $\phi_p$  поворота рулевого колеса, 3 и 4 – скорость  $\omega_\alpha$  и угол отклонения продольной оси  $\alpha_c$  машины от прямолинейного движения

По результатам моделирования построены зависимости изменения угла отклонения  $\alpha_c$  во времени в зависимости от скорости движения машины, которые приведены на рисунке 3.

Из анализа полученных результатов следует, что с увеличением скорости прямолинейного движения от  $V=0,5\text{ м/с}$  до  $V=2,5\text{ м/с}$  величина угла отклонения продольной оси  $\alpha_c$  машины от прямолинейного движения увеличивается. Через 1с от начала «поворота» величина  $\alpha_c$  достигла  $0,00243\text{ рад}$  для  $V=0,5\text{ м/с}$  и, соответственно,  $\alpha_c=0,042033\text{ рад}$  для  $V=2,5\text{ м/с}$ . С увеличением времени в процессе «поворота» до  $t=5\text{ с}$  величина  $\alpha_c$  для скорости  $V=0,5\text{ м/с}$  составила  $0,025395\text{ рад}$ , а для скорости  $V=2,5\text{ м/с}$  соответственно -  $\alpha_c=0,29118\text{ рад}$ .

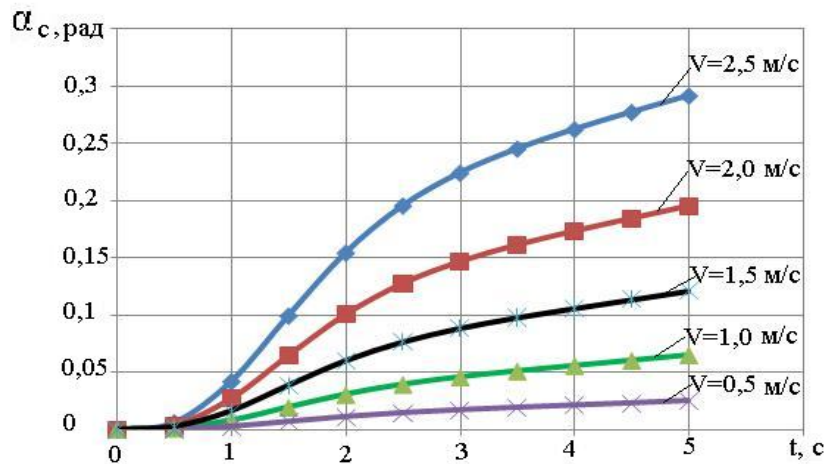


Рисунок 3 – Зависимости изменения угла отклонения продольной оси  $\alpha_c$  машины от прямолинейного движения для различных скоростей движения машины

Значения нелинейных зависимостей  $\alpha_c = f(t)$  для принятых скоростей движения, представленные на рис. 3, были аппроксимированы параболой с использованием метода наименьших квадратов. Полученные уравнения использовались для построения траекторий движения машины при выполнении режима «поворот».

Так как величина скорости движения  $V$  в процессе расчетов принимается постоянной, это дает возможность получить траектории движения машины  $\tau = f(x,y)$ , рисунок 4, для различных скоростей с использованием формул:

$$X = V \cdot t ; \quad Y = V \cdot \int_0^t \alpha_c \cdot dt .$$

Из представленных на рис. 4 кривых следует, что при выполнении «поворота» координаты отклонения траектории от прямолинейного движения составляют  $X \approx 1\text{ м}$ ,  $Y \approx 0,01\text{ м}$  для всех рассматриваемых скоростей движения. Величина времени выполнения «поворота» составляла 5с. К моменту окончания «поворота» координаты отклонения траектории от прямолинейного движения в зависимости от скорости машины составляют:  $X=2,25\text{ м}$  и  $Y= 0,012\text{ м}$  для  $V=0,5\text{ м/с}$ ;  $X=11,25\text{ м}$  и  $Y= 0,142\text{ м}$  для  $V=2,5\text{ м/с}$ .

Замкнем ранее разомкнутую обратную связь. Это дает нам возможность рассмотреть процесс работы системы «ЧО – машина» при движении машины по

базовой траектории. Принимаем, что передаточная функция обратной связи  $W_{oc}(p)$  имеет следующий вид:

$$W_{oc}(p) = K_{oc} \cdot$$

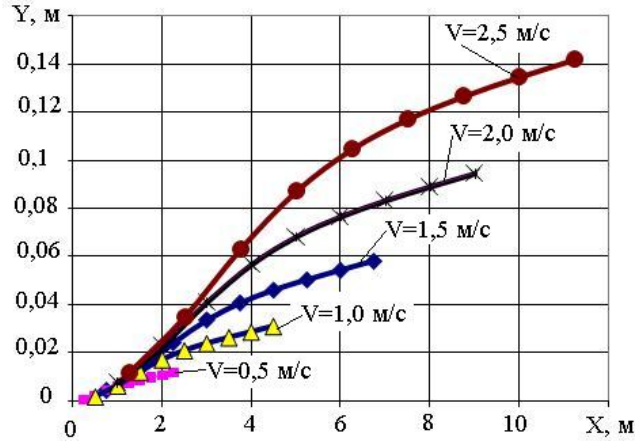


Рисунок 4 – Траектории движения системы «ЧО – машина» при выполнении «поворота» для различных скоростей движения машины

На первом этапе принимаем величину коэффициента передачи  $K_{oc} = const$ . Для определения закона изменения величины сигнала рассогласования  $\Delta$  базовой траектории  $\tau_b$  и траектории движения машины  $\tau$  воспользуемся экспериментально полученными данными [5], которые представлены на рисунке 5.

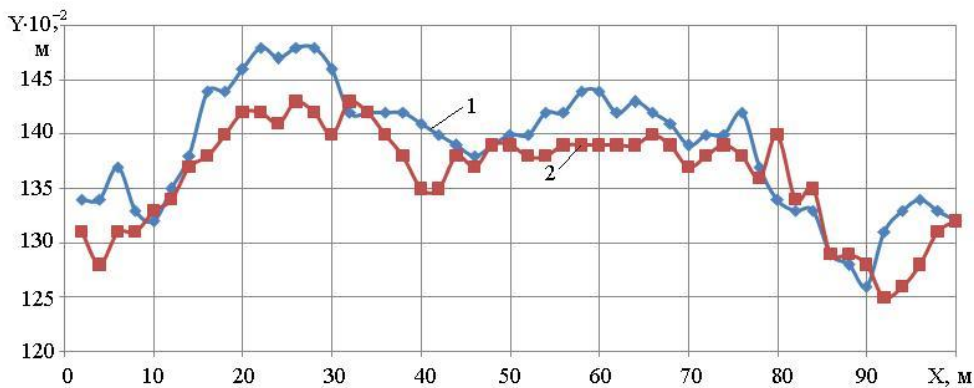


Рисунок 5 – Траектория движения рамки рабочих органов в процессе уборки (1) относительно траектории ряда сахарной свеклы (2) .

Принимаем траекторию движения рамки рабочих органов в процессе уборки за траекторию движения машины  $\tau$ , а траекторию изменения ряда сахарной свеклы за базовую траекторию  $\tau_b$ . Таким образом, величина сигнала рассогласования  $\Delta$  представляет собой некоторую случайную величину, которая может быть представлена в виде среднеквадратического отклонения  $\sigma$  траектории  $\tau$  и базовой траектории  $\tau_b$ , которое определялось по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\sum(\tau - \tau_0)^2 / N},$$

где  $\tau_i, \tau_{0i}$  – координаты текущих значений траектории рамки и базовой траектории;  
 $N$  – число измерений.

Анализ траекторий представленных на рис. 5 показывает, что параметры управляющих воздействий, которые должен будет воспроизводить ЧО для копирования сигнала рассогласования  $\Delta$ , зависят от скорости движения машины, частоты и амплитуды возмущений.

Изменение величины  $\Delta=f(t)$  для скорости движения машины  $V=1,0\text{м/с}$  показано на рисунке 6. Принимаем, что ордината  $\Delta$  в пределах интервала  $dt$  меняется по линейному закону.

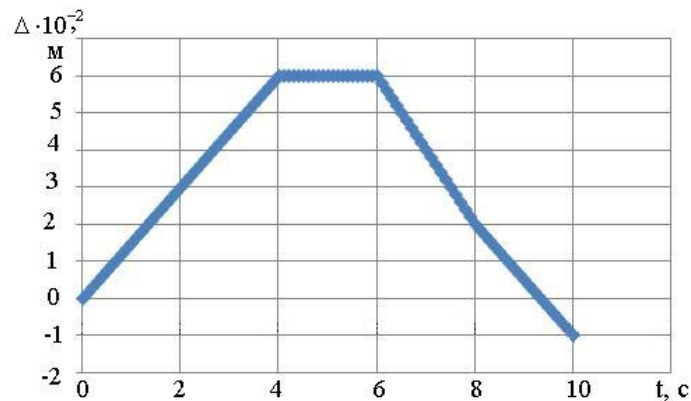


Рисунок 6 – Зависимость изменения сигнала рассогласования  $\Delta$  от времени для скорости движения машин  $V=1,0\text{м/с}$

Из кривой, приведенной на рис. 6 следует, что водитель в процессе движения должен выполнить 4 управляющих воздействия, частота которых находится в диапазоне от 0,25 Гц до 0,5 Гц. При этом амплитуда изменения траектории должна составлять от 60мм до 80мм.

Значения среднеквадратического отклонения  $\sigma$  траектории  $\tau$  и базовой траектории  $\tau_0$  в функции от скорости движения  $V$  [5], в дальнейшем были аппроксимированы параболой и представлены на рисунке 7.

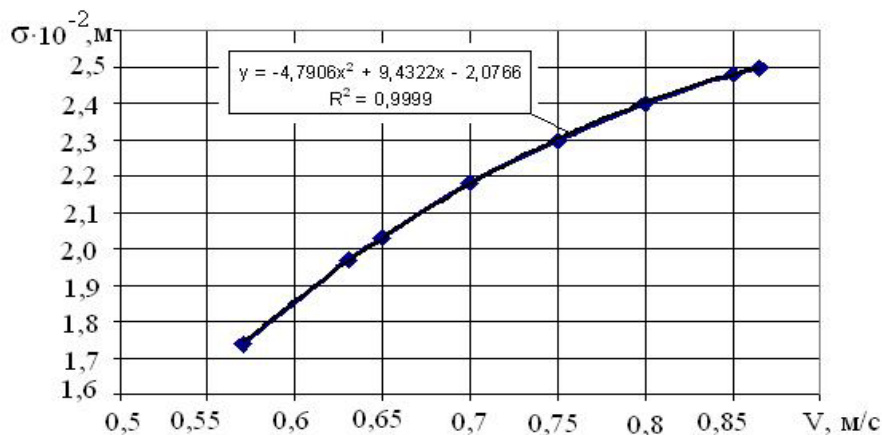


Рисунок 7 – Зависимость среднеквадратического отклонения  $\sigma$  от скорости движения  $V$

Полученные значения  $\sigma$  в функции от  $V$  дают возможность при проведении исследований представить входное возмущение  $\sigma$  в виде случайной функции, подчиняющейся нормальному закону. Принимаем, что для данного закона математическое ожидание  $m=0$ , величина среднеквадратического отклонения  $\sigma = -4,7906 \cdot V^2 + 9,4322 \cdot V - 2,0766$ .

Проведенное моделирование для скорости движения  $V=1,0\text{м/с}$  показало высокую сходимость полученных результатов с данными, приведенными на рис. 6. Однако с увеличением скорости движения до  $V=2,0\text{м/с}$  (значение  $\sigma_{v=2\text{м/с}} = \sigma_{v=1\text{м/с}}$ ) при использовании данных, приведенных на рис. 5, наблюдается увеличение погрешности, что приводит к снижению качества уборки.

### Выводы

Изучение динамики управления системы «ЧО - машина с объемным гидроприводом» в процессе «поворота» для разомкнутой системы показало правильность принятой методики исследования. Для замкнутой системы сигнал рассогласования между базовой и реальной траекториями движения может быть принят в виде случайной величины. Эта величина является среднеквадратическим отклонением  $\sigma$  между базовой и реальной траекториями движения. Определена зависимость отклонения  $\sigma$  от скорости движения машины  $V$ . Установлено, что управляющие воздействия водителя при скорости движения  $V=1\text{м/с}$  во времени могут быть представлены кусочно-линейными зависимостями с частотой от 0,25 до 0,5 Гц. Полученные данные могут быть использованы при проектировании автоматов вождения для уборочных машин.

**Список литературы:** 1. Мандрыка В.Р., Сторожук Д.И., Олейник И.П., Соколенко М.Н. Моделирование движения корнеуборочной машины с объемным гидроприводом управляемого моста. Исследование рабочих органов машин для сахарной свеклы и кукурузы с целью повышения их эффективности. Сборник научных трудов ВИСХОМ. Москва, 1989, с. 36-44. 2. Мандрыка В.Р. Методика построения математической модели управляемости и курсовой устойчивости самоходной корнеуборочной машины. Вестник Харьковского государственного политехнического университета № 79, Харьков, 2000, с.44-45. 3. Мандрыка В.Р. Математическая модель «человек – оператор» как элемент привода управления самоходных сельскохозяйственных агрегатов. Вестник НТУ «ХПИ» Сборник научных трудов. Тематический выпуск Автомобиле- и тракторостроение. Харьков НТУ «ХПИ» - 2003. – №4. с. 46-50. 4. Коденко М.Н. Человек-оператор в системе управления трактором. – Конструирование и исследование тракторов. Вып. 5 Вестник ХПИ №185, Харьков, 1982, с.5-7. 5. Мандрыка В.Р. Экспериментальное исследование управляемости корнеуборочной машины при выполнении технологических операций. Збірник наукових праць Національного аграрного університету механізації сільськогосподарського виробництва. Том 5. Сучасні проблеми механізації сільського господарства. - Київ: НАУ, 1999, с.72-75.