

## УЧЕТ СИЛ СО СТОРОНЫ РАБОЧЕГО ОРУДИЯ В УПРАВЛЕНИИ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАКТОРНЫМ АГРЕГАТОМ

*Жаков А.О., Трояновская И.П.*

*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск*

**Ключевые слова:** обратная связь, рабочее орудие, предельная сдвигающая сила, беспилотный машинно-тракторный агрегат.

**Аннотация.** Статья посвящена курсовой устойчивости беспилотных машинно-тракторных агрегатов, выполняющих работу в прямолинейном движении. Одной из причин отклонения агрегата от заданного курса является взаимодействие рабочего орудия с грунтом. Для его учета необходимо расширить канал обратной связи системы управления путем фиксации сил со стороны рабочего орудия. Реализация предлагается путем установки тензокаретки с силовыми датчиками продольной и поперечной силы. Разработанный авторами программный комплекс позволяет вычислить предельное значение сдвигающей силы.

## ACCOUNTING FOR FORCES FROM THE WORKING IMPLEMENT IN THE CONTROL OF AN UNMANNED TRACTOR UNIT

*Zhakov A.O., Troyanovskaya I.P.*

*South Ural State University, Chelybinsk*

**Keywords:** feedback, working tool, limiting shear force, unmanned machine-tractor unit.

**Abstract.** The article is devoted to the directional stability of unmanned machine and tractor units performing work in linear motion. One of the reasons for the deviation of the unit from the given course is the interaction of the working tool with the ground. To take it into account, it is necessary to expand the feedback channel of the control system by recording the forces from the working tool. The implementation is proposed by installing a strain gauge carriage with longitudinal and transverse force sensors. The software package developed by the authors allows one to calculate the limiting value of the shear force.

Беспилотные наземные транспортные комплексы в настоящее время приобретают все большую популярность. Уже есть беспилотные автомобили, такси и автобусы. К этому виду техники начинают проявлять интерес и тракторные агрегаты. Наибольшую актуальность беспилотное управление приобретает применительно к сельскохозяйственной технике. Это объясняется большим объемом сезонных работ при ограниченности времени их выполнения. Круглосуточное использование беспилотников (включая ночные смены) позволяет увеличить время выполнения работы.

Основные рабочие операции сельскохозяйственные тракторные агрегаты, как правило, выполняют на прямолинейном курсе. Поэтому качество и производительность работы во многом зависит от курсовой устойчивости прямолинейного движения [1].

Сегодня наиболее широкое применение получил спутниковый контроль движения машинно-тракторных агрегатов с помощью GPS (Глонас) навигации. Однако, данный вид контроля основан на фиксировании координат машины и не отражает причину ее отклонения от заданного курса.

Причинами любого отклонения от курса всегда является внешнее силовое воздействие. Существуют системы для контроля силового воздействия со стороны движителя. Они осуществляют контроль крутящих моментов или скоростей ведущих колес машины.

Вместе с тем, машинно-тракторные агрегаты, в отличие от любых транспортных машин, контактирует с грунтом не только с помощью движителя, но и посредством рабочего орудия. В связи с этим, для обеспечения их курсовой устойчивости необходимо учитывать оба способа силового воздействия.

Модель силового взаимодействия имеет вид:

$$\begin{cases} 0 = F_x - P_f + P_x, \\ 0 = F_y + P_y, \\ 0 = M(F) + M(P), \end{cases} \quad (1)$$

где  $F_x, F_y, M(F)$  – силы и момент трения (сцепления) в контакте движителя с грунтом;  $P_f$  – сила сопротивления перекатывания;  $P_x, P_y, M(P)$  – внешние силы и момент со стороны рабочего орудия.

В случае, когда внешняя сила  $P$  со стороны рабочего орудия не проходит через центр тяжести машины имеет место неуправляемый сдвиг в криволинейную траекторию [2-3].

Ранее проведенные исследования [4] показывают, что для каждого направления внешней силы соответствует свое значение предельной сдвигающей силы. У гусеничных машин, поперечно расположенные грунтозацепы приводят к анизотропии взаимодействия движителя с грунтом, что способствует дополнительному снижению предельного значения сдвигающей силы [5-6].

Под действием предельной сдвигающей силы со стороны рабочего орудия машина отклоняется от заданного прямолинейного курса. С учетом малых рабочих скоростей уравнения движения можно записать в виде криволинейных интегралов 1 рода [7]:

$$\begin{cases} y_c = \int_0^T V \cos \left( \int_0^t \frac{V}{R} d\tau \right) dt, \\ x_c = \int_0^T V \sin \left( \int_0^t \frac{V}{R} d\tau \right) dt, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_c, y_c$  – координаты центра тяжести трактора;  $V$  – скорость управляемого движения;  $t, T$  – текущее и конечное время движения;  $R$  – радиус кривизны траектории движения, определяется силовым взаимодействием из (1).

Численный эксперимент подтвердил увод машины при действии внецентренной внешней силы, достигшей предельного значения [8]. Разработанный программный комплекс [9] позволяет спрогнозировать изменение траектории при воздействии внешней силы со стороны рабочего орудия.

В связи с этим, для обеспечения курсовой устойчивости машинно-тракторного агрегата, в канал обратной связи системы управления беспилотных транспортных средств необходимо добавить контроль внешнего силового

воздействия со стороны рабочего орудия. Для этого предлагается в раму крепления рабочего орудия к трактору установить тензокоретку с силовыми датчиками, фиксирующими вертикальные и горизонтальные усилия. Данное предложение было передано на «Челябинский компрессорный завод», где реализовано внедрение и в настоящий момент планируются натурные испытания нового беспилотного сельскохозяйственного агрегата.

### Список литературы

1. Трояновская И.П., Жаков А.О. Курсовая устойчивость машинно-тракторного агрегата при вспашке // Тракторы и сельхозмашины. – 2020. – № 6. – С. 41-49.
2. Позин Б.М., Трояновская В.Г. Апанасик Задачи пассивного поворота гусеничной машины (постановка, модель движения) // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2007. – № 25(97). – С. 70-74.
3. Апанасик В.Г., Позин Б.М., Трояновская И.П. Задача страгивания в теории поворота транспортных и тяговых машин // Механика и процессы управления моторно-трансмиссионных систем транспортных машин: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Курган: Курганский государственный университет, 2003. – С. 156-159.
4. Zhakov A.O., Troyanovskaya I.P., Shepelev S.D. Method for calculating the limiting shear force deviating from a given direction of movement using the example of the B12 bulldozer // Proceedings of the 8th international conference on industrial engineering (ICIE 2022). 2023, pp. 779-787.
5. Жаков А.О., Трояновская И.П. Влияние анизотропии на взаимодействие гусеничного движителя с грунтом при повороте машины // Тракторы и сельхозмашины. – 2020. – № 2. – С. 43-49.
6. Трояновская И.П. Взаимодействие гусеничного движителя с грунтом на повороте // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 12. – С. 19-20.
7. Носков Н.К., Позин Б.М., Трояновская И.П. Математическая модель бокового увода трактора // Известия МГТУ МАМИ. – 2017. – № 1(31). – С. 35-39.
8. Troyanovskaya I.P., Pozin B.M., Noskov N.K. Ploughing tractor lateral withdrawal model // Procedia Engineering. 2017, pp. 1540-1546.
9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020615467 РФ. Увод трактора под действием внецентренной крюковой нагрузки / А.О. Жаков, И.П. Трояновская. – Заявка №2020614595 от 25.05.2020.

### Сведения об авторах:

*Жаков Андрей Олегович* – аспирант;

*Трояновская Ирина Павловна* – д.т.н., профессор, профессор кафедры колесных и гусеничных машин.