

## Повышение эффективности автоматических систем вождения машинно-тракторным агрегатом

*А.В. Линенко, д.т.н, профессор, Р.Р. Галиуллин, д.т.н, профессор, А.И. Азнагулов, ассистент, В.В. Лукьянов, аспирант, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ*

В большинстве систем автоматического параллельного вождения машинно-тракторным агрегатом (МТА) электродвигатель осуществляет вращение рулевого колеса фрикционно или при помощи жёсткой механической связи [1, 2, 7–10]. Такие решения имеют ряд недостатков: проскальзывание фрикционов, износ зубчатой передачи, растяжение цепи/ремня, сложность монтажа, дополнительное усилие на рулевом колесе при ручном управлении и др. Наличие дополнительных механических связей между рулевым колесом и ротором электродвигателя негативно сказывается на точности управления агрегатом, надёжности и стоимости подруливающего устройства.

С учётом выявленных недостатков в системах автоматического подруливания предлагается оснастить МТА мехатронным модулем, который состоит из двух частей: программно-аппаратной и электромеханической. В программно-аппаратной части реализован закон управления движением МТА по сигналам навигационной системы. В электромеханической части использован бесколлекторный двигатель постоянного тока (БКДПТ) с внешним ротором, который является составной частью рулевого колеса.

Изменение положения ротора двигателя является поворотом рулевого колеса без промежуточных механизмов. Применение мехатронного модуля позволяет увеличить быстродействие управления МТА, упростить конструкцию и снизить стоимость подруливающего устройства.

**Цель исследования** заключается в упрощении конструкции, повышении надёжности и снижении себестоимости автоматических систем управления, а также повышении точности движения МТА путём применения мехатронного модуля.

**Материал и методы исследования.** Функциональная схема разработанного мехатронного модуля состоит из следующих элементов: навигационного приёмника GPS/GLONASS; датчика угла поворота управляемых колёс; микропроцессорной системы с программой управления МТА; электропривода рулевого механизма, основанного на БКДПТ (рис. 1) [3, 4].

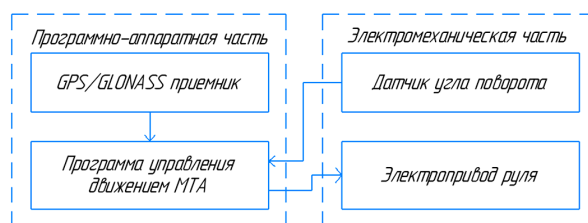


Рис. 1 – Функциональная схема мехатронного модуля

Схема электромеханической части рассматриваемого мехатронного модуля устроена следующим образом (рис. 2). Статор 4 БКДПТ через фланец сердечника статора 2 жёстко закреплён на рулевой колонке 1. Рулевое колесо 10 через фланец 8 жёстко соединено с ротором 7 внешнего вращения. Ротор 7 внешнего вращения также зафиксирован на рулевой колонке посредством подшипника 6 с возможностью вращения. Вращательное движение ротора 7 через рулевое колесо 10 передаётся валу 9 рулевого колеса. Рассматриваемый БКДПТ работает на дискрет-

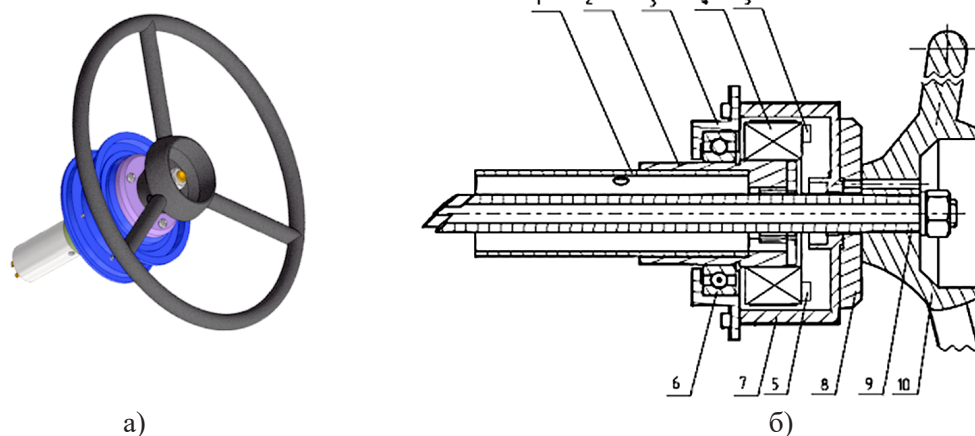


Рис. 2 – Электромеханическая часть мехатронного модуля рулевого управления с БКДПТ (а – общий вид, б – в разрезе):

1 – рулевая колонка, 2 – фланец сердечника статора, 3 – корпус подшипника, 4 – статор, 5 – датчики Холла, 6 – подшипник, 7 – ротор, 8 – фланец ротора, 9 – вал рулевого колеса, 10 – рулевое колесо

ных датчиках Холла 5, которые необходимы для определения положения ротора 7. Для управления фазами двигателя используется разнополярная 6-тактная парная коммутация, в зависимости от сигналов датчиков Холла 5.

Для описания движения трактора совместно с сельхозмашиной принимаем, что МТА имеет задние ведущие колёса и управляемые – передние. Кинематическая схема МТА при движении представлена на рисунке 3.

Кинематику движения МТА рассмотрим с точки зрения движения его характерных точек. В рассматриваемой работе в качестве ведущей точки агрегата при автоматическом вождении принята середина передней оси трактора (точка, где установлена GPS/GLONASS-антенна), как наиболее быстро реагирующая на поворот управляемых колёс.

На рисунке 3 и в дальнейших рассуждениях приняты следующие обозначения:  $\varphi$  – угол отклонения управляемых колёс трактора (в обычном режиме он пропорционален управляющему воздействию мехатронного модуля на рулевой механизм МТА, рад;  $\theta$  – угол между продольной осью сельхозмашины и продольной осью трактора, рад;  $\Psi_{тра}$ ,  $\Psi_{агр}$  – угол поворота трактора и сельхозмашины, рад;  $V_{тра}$ ,  $V_{агр}$  – скорость трактора и сельхозмашины, м/с;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – линейные параметры МТА, соответственно: расстояние от оси управляемых колёс до центра вращения трактора (на рисунке точка  $O$ ), от центра вращения трактора до точки стыковки трактора с сельхозмашиной, от точки стыковки трактора с сельхозмашиной до оси вращения сельхозмашины, м;  $\Delta s$  – пройденный путь (м) трактором в текущем направлении за бесконечно малый промежуток времени  $\Delta t$ ;  $\vec{W} = \dot{\Psi}_{агр} \cdot \vec{c}$  – вектор линейной скорости точки соединения сельхозмашины с трактором, перпендикулярный продольной оси сельхозмашины, определяющий угловую скорость поворота прицепной сельхозмашины.

Исходя из данной кинематики движения МТА, была разработана математическая модель, работающая по заданному алгоритму. Для реализации алгоритма был выбран объектно-ориентированный язык программирования C#. Программа управления МТА содержит подпрограмму, которая автоматически прокладывает оптимальный маршрут движения по полю с учётом типа трактора, прицепного или навесного оборудования. Данная подпрограмма визуально отображает траекторию, текущее положение трактора, обрабатываемое поле с его границами в графическом интерфейсе (рис. 4).

**Результаты исследования.** Подобраны параметры ПИД-регулятора БКДПТ. В результате определения коэффициентов ПИД-регулятора получен оптимальный режим работы БКДПТ

мехатронного модуля. Как видно по графику динамической зависимости скорости вращения ротора БКДПТ при разных значениях момента силы сопротивления на рулевом колесе, скорость вращения ротора стабилизируется на требуемом значении не более 0,3 сек. с момента воздействия тормозящей силы разных значений (рис. 5).

Произведены испытания двух автоматических систем управления МТА – мехатронного модуля и редукторного подруливающего устройства на отклонения МТА от траектории движения на участке длиной 600 м (рис. 6) [5, 6].

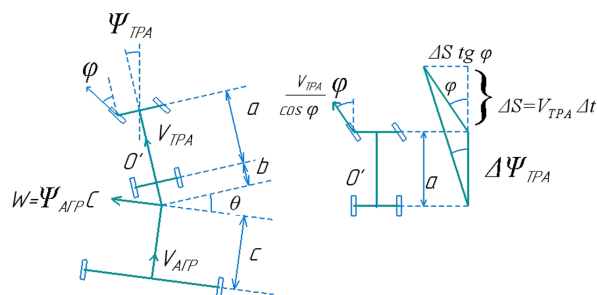


Рис. 3 – Кинематическая схема «трактор – сельхозмашина»

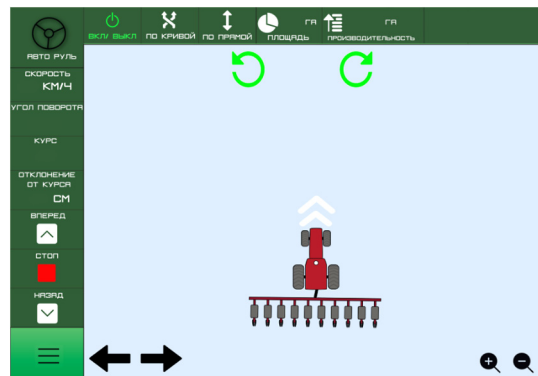


Рис. 4 – Графический интерфейс программы управления МТА

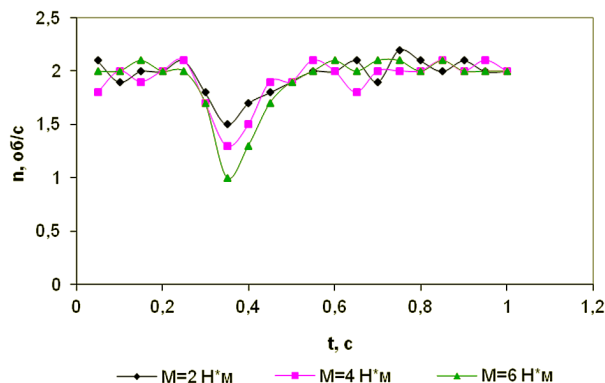


Рис. 5 – Динамическая зависимость скорости вращения ротора БКДПТ при разных значениях тормозящего момента на рулевом механизме

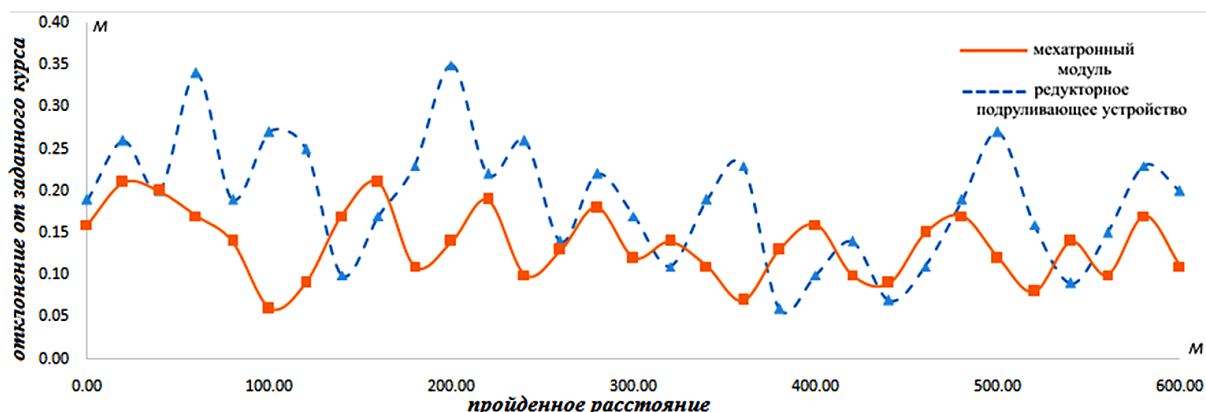


Рис. 6 – Отклонение МТА от заданной траектории движения при оснащении трактора различными подруливающими устройствами

Как видно, среднее отклонение от заданной траектории движения МТА с мехатронным модулем на 17% меньше, чем с редукторным подруливающим устройством.

**Выводы.** Точность движения МТА с предложенным мехатронным модулем на 17% выше по сравнению с подруливающим устройством на базе редукторного электропривода. Объясняется это тем, что время реакции мехатронного модуля не превышает 0,25 сек. Надёжность систем в работе не оценивалась, но на основании меньшего числа элементов конструкции можно предположить, что надёжность мехатронного модуля выше. Стоимость разработанного мехатронного модуля составляет 240 тыс. руб.

Внедрение мехатронного модуля для управления МТА с использованием навигационных систем позволяет уменьшить эксплуатационные затраты (на семена до 15%, химикаты и топливо не менее 10%), снизить утомляемость оператора и увеличить производительность труда (возможность работы в ночное время, а также в условиях плохой видимости). Простой монтаж подруливающего устройства обеспечивает быструю его установку на любую отечественную и импортную технику.

## Литература

1. Воронков В.Н. Воронков И.В. Сравнительный анализ технических, эксплуатационных и экономических характеристик устройств параллельного вождения сельхозтехники: учебно-методическое пособие. М.: Минсельхоз РФ, ФГБОУ «РИАМА», 2015. 23 с.
2. Мехатронная система для автоматического управления машинно-тракторным агрегатом с бекколлекторным электродвигателем / А.В. Линенко, В.В. Лукьянов, Ш.Ф. Сираев [и др.] // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. № 1. Т. 15. С. 33–40.
3. Подруливающее устройство для управления машинно-тракторным агрегатом с редукторным электроприводом / А.В. Линенко, В.В. Лукьянов, Ш.Ф. Сираев [и др.] // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (50). С. 125–130.
4. Пат. РФ на полезную модель № 183287. Исполнительное устройство для автоматического управления машинно-тракторным агрегатом / А.В. Линенко, А.И. Азнагулов, М.М. Ямалетдинов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ; №2018114392; заявл. 18.04.2018; опубл. 17.09.2018. Бюл. № 26.
5. Пат. РФ №190223. Исполнительное устройство для автоматического управления машинно-тракторным агрегатом / А.В. Линенко, В.В. Лукьянов, Ш.Ф. Сираев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ; заявл. 31.01.2019; опубл. 24.06.2019. Бюл. № 18.
6. Труфляк Е.В., Курченко Н.Ю., Креймер А.С. Мониторинг и прогнозирование в области цифрового сельского хозяйства по итогам 2018 г. Краснодар: КубГАУ, 2019. 100 с.
7. Bevly D. M., J. C. Gerdes, and B. W. Parkinson (2002). A new yaw dynamic model for improved high speed control of a farm tractor. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 124: 659–667.
8. Harrer, M., and P. Pfeffer. 2015. *Steering handbook*, Springer
9. Sean Mitchell, Adoption of precision agriculture technologies in Ontario crop production. *Canadian Journal of Plant Science*, 2018, Vol. 98, No. 6: P. 1384–1388
10. Winner, H., S. Hakuli, F. Lotz and C. Handbook of driver assistance systems, Springer, Cham (2015).