

EDN: GKNLWD

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-64-71



Научная статья

УДК 631.171:004



Автоматизированный машинно-тракторный агрегат для кормопроизводства

Захид Адыгезалович Годжаев¹,

доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
e-mail: fic51@mail.ru;

Сергей Анатольевич Васильев^{2,3},

доктор технических наук,
заведующий кафедрой,
e-mail: vsa_21@mail.ru;

Сергей Александрович Мишин²,

старший преподаватель,
e-mail: supers.ya@yandex.ru;

Евгений Валентинович Рузанов⁴,

генеральный директор,
e-mail: ruza2005@yandex.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Российская Федерация;

²Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Российская Федерация;

³Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; г. Княгинино, Российская Федерация;

⁴ООО «Фарватер», г. Красногорск, Московская область, Российская Федерация

Реферат. Точное земледелие значительно развивается в последние годы благодаря достижениям в области роботизации и автоматизации. В научной статье разработали автоматизированный сельскохозяйственный машинно-тракторный агрегат (МТА) путем использования универсальных мехатронных модулей систем его управления для скашивания трав. *(Цель исследования)* Разработать функционально-технологическую схему автоматизированного МТА и универсальные мехатронные модули, устанавливаемые на механические органы управления оператора, для автоматического выполнения технологического процесса скашивания трав. *(Материалы и методы)* Разработана функционально-технологическая схема МТА. Машинно-тракторный агрегат состоит из системы дистанционного управления, трактора, системы контроля и управления доступом (СКУД) к МТА и технологической машины. Описана методика автоматического управления МТА на агроландшафте. Выполнено теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров универсальных мехатронных модулей для управления сцеплением и тормозной системой. Проведен расчет механизма мехатронного модуля и определены: передаточное отношение винтовой передачи, ход винта и скорость перемещения гайки. Установлена зависимость изменения скорости хода педали (угла перемещения педали) от скорости перемещения гайки мехатронного модуля воздействия. Разработано программное обеспечение на языке программирования для контроллера управления универсальными мехатронными модулями. *(Результаты и обсуждение)* Дистанционным способом, используя пульт оператора, реализовали автоматическое управление МТА, в составе колесного трактора ЛТЗ-120Б + роторной косилки КРН-2,4, на агроландшафте. Провели полевое тестирование взаимодействия программы с аппаратной частью универсальных мехатронных модулей систем управления МТА. Сравнительные экспериментальные исследования с оператором и в автоматическом режиме (с применением мехатронных приводов) проведены при выполнении операции кошения травы машинно-тракторным агрегатом при прямолинейном движении. *(Выводы)* Предварительные исследования автоматизированного сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата показали, что значения эксплуатационных показателей при работе с косилкой находятся в допустимых пределах, например производительность за 1 час основного времени составила 3,56 гектара, рабочая скорость движения – $10 \pm 0,3$ км/ч, а высота среза трав – 8 ± 1 сантиметров.

Ключевые слова: автоматизация, машинно-тракторный агрегат, универсальные, мехатронные модули, системы управления, скашивание трав

■ **Для цитирования:** Годжаев З.А., Васильев С.А., Мишин С.А., Рузанов Е.В. Автоматизированный машинно-тракторный агрегат для кормопроизводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 64-71. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-64-71. EDN: GKNLWD.

Scientific article

Automated Machine-Tractor Unit for Grass Mowing

Zakhid A. Godzhaev¹,

Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian
Academy of Sciences, chief researcher,
e-mail: fic51@mail.ru;

Sergey A. Vasilyev^{2,3},

Dr.Sc.(Eng.), senior lecturer,
e-mail: vsa_21@mail.ru;

Sergey A. Mishin²,
assistant lecturer,
e-mail: supers.ya@yandex.ru;

Evgeny V. Ruzanov⁴,
general director,
e-mail: ruza2005@yandex.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Chuvash Republic, Russian Federation;

³Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation;

⁴Farvater LLC, Krasnogorsk, Moscow region, Russian Federation

Abstract. Recent advancements in robotics and automation have significantly contributed to the progress of precision agriculture. This study presents the development of an automated machine-tractor unit (MTU) designed for grass mowing, incorporating universal mechatronic control modules. (*Research purpose*) The purpose of this research is to design a functional and technological scheme for an automated machine-tractor unit and to develop universal mechatronic modules that can be mounted onto the mechanical control elements typically operated by a human driver. These modules are intended to enable the automated execution of the grass mowing process. (*Materials and methods*) A functional and technological scheme of the machine-tractor unit was developed. The unit consists of a remote control system, a tractor, an access control and management system (ACMS), and a technological implement. The methodology for the automatic control of the machine-tractor unit in an agro-landscape was described. A theoretical justification was provided for the design and technological parameters of the universal mechatronic modules used to control the clutch and braking systems. Calculations were conducted for the mechatronic module mechanism, including the determination of the screw drive gear ratio, screw travel, and nut displacement speed. A functional relationship was established between the pedal stroke velocity (change in pedal angle) and the nut displacement speed in the mechatronic actuation module. Control software for the universal mechatronic modules was developed using a programming language suitable for the selected controller. (*Results and discussion*) Automatic control of the machine-tractor unit was successfully implemented in an agro-landscape setting using a remote control panel, an LTZ-120B wheeled tractor, and a KRN-2.4 rotary mower. Field tests were conducted to evaluate the interaction between the control software and the hardware components of the universal mechatronic control modules. Comparative experimental studies were performed during straight-line mowing operations to evaluate the system performance under both manual control (with an operator) and automated control (using mechatronic actuators). (*Conclusions*) Preliminary tests of the automated agricultural machine-tractor unit demonstrated that its operational performance indicators remained within acceptable limits during mower-assisted operations. Specifically, the system achieved a productivity rate of 3.56 hectares per hour of effective operation, maintained a working speed of 10 ± 0.3 kilometers per hour, and ensured a grass cutting height of 8 ± 1 centimeters.

Keywords: automation, machine-tractor unit, universal, mechatronic modules, control systems, grass mowing

■ **For citation:** Godzhaev Z.A., Vasiliev S.A., Mishin S.A., Ruzanov E.V. Automated machine-tractor unit for grass mowing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 64-71. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-64-71. EDN: GKNLWD.

Точное земледелие значительно развивается в последние годы благодаря достижениям в роботизации и автоматизации [1]. Более низкие производственные затраты, меньшая зависимость от ручного труда и более надежное качество урожая становятся реальностью при использовании автоматизированных тракторов и сельскохозяйственных машин [2].

Автоматизация функций сельскохозяйственных машин возникла в 1980-е годы, когда зародилась концепция точного земледелия [3]. В настоящее время автономные системы очень полезны, потому что они упрощают повседневные задачи человека [4]. В ряде работ [5] предлагается ускорить внедрение технологических инноваций в области интеллектуального сельскохозяйственного машиностроения, что обеспечит беспилотное управление наземной техникой [6]. В то же время авто-

матизация агротехнических операций является важной технической основой в условиях дефицита трудовых ресурсов и снижения интенсивности труда в агропроизводстве [7]. Например, компания *New Holland* разработала трактор *NH Drive*, который автономно выполняет различные дневные и ночные операции [8]. Работу можно контролировать дистанционно с планшета или из кабины трактора, без непосредственного наблюдения оператора.

На сайте завода-изготовителя *Yanmar* представлен проект *Robot Tractor* [9]. Система автоматизированного рулевого управления основана на информации о позиционировании трактора на поле хозяйства. Также используется система электронного поводка, когда оператор управляет в реальном времени двумя тракторами: одним непосредственно вручную, а вторым через электронную систему автоматизированного рулевого управления [8].

Ряд технических решений по автоматизации управления [10] позволяет вывести проекты по беспилотным тракторам на стадию прототипов [11] с возможностью выполнения таких агротехнических операций [12], как обработка почвы [13], сбор урожая [14], опрыскивание, кошение культур [15], в том числе на склоновых землях [16]. Хотя некоторые агроприемы могут быть особенно сложными для полной автоматизации [17].

Эффективность автоматизированных мобильных энергетических средств [18] в большей степени будет проявляться в повышении производительности полевых операций [19] и оптимизации управления технологическими процессами [20] для решения проблем цифрового АПК [21].

Цель исследований. Разработка функционально-технологической схемы автоматизированного машинно-тракторного агрегата (МТА) и универсальных мехатронных модулей, устанавливаемых на механические органы управления оператора, для автоматического выполнения технологического процесса скашивания трав.

Материалы и методы. Тягово-скоростные характеристики МТА при выполнении технологического процесса скашивания трав выразим с помощью мощностного баланса для тягово-приводного агрегата:

$$N_e = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n F_i V, \quad (1)$$

$$V = \frac{N_e}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad (2)$$

где N_i – потери мощности на преодоление сопротивлений во время движения, кВт; F_i – силы сопротивлений во время движения, Н; V – рабочая скорость перемещения, м/с; N_e – эффективная мощность двигателя трактора, кВт.

После преобразований рабочая скорость перемещения тягово-приводного агрегата с косилкой

$$V = \frac{\left(N_e - \frac{N_{\text{вОМ}}}{\eta_{\text{вОМ}}} \right) \eta_m \eta_{\delta}}{F_f + F_{\alpha} + F_M}, \quad (3)$$

$$F_f = fG \cos \alpha, \quad (4)$$

$$F_{\alpha} = \pm G \sin \alpha, \quad (5)$$

$$F_M = \kappa_M B_p, \quad (6)$$

где $N_{\text{вОМ}}$ – затраты мощности на привод вала отбора мощности (ВОМ), кВт; η_m – механический КПД ВОМ, кВт; η_{δ} – механический КПД трансмиссии трактора; η_{δ} – КПД, учитывающей потери мощности на буксование; F_f – сопротивление перекачиванию МТА, кН; F_{α} – сопротивление спуску или подъ-

ему МТА, кН; F_M – тяговое сопротивление роторной косилки, кН; f – коэффициент сопротивления перекачиванию МТА; G – общий вес МТА, кН; α – продольный уклон по ходу МТА, град; r_m – удельное сопротивление роторной косилки, кН/м; B_p – конструктивная ширина захвата косилки, м.

Подставим выражения (4)–(6) в уравнение (3) и с учетом КПД трансмиссии трактора для прямого и заднего хода получим скорости перемещения МТА с косилкой для этих режимов:

$$V_n = \frac{\left(N_e - \frac{N_{\text{вОМ}}}{\eta_{\text{вОМ}}} \right) \eta_m \eta_{\delta}}{G(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + \kappa_M B_p}, \quad (7)$$

$$V_z = \frac{N_e \eta_m \eta_{\delta}}{G(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + \kappa_M B_p}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{тп}}$ и $\eta_{\text{тз}}$ – механический КПД трансмиссии трактора для прямого и заднего хода.

Время, затраченное на совершение агрегатом одного цикла рабочего хода на сельскохозяйственном поле, определится в соответствии с выражением (3) по формуле:

$$t_p = \frac{G(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + \kappa_M B_p}{\left(N_e - \frac{N_{\text{вОМ}}}{\eta_{\text{вОМ}}} \right) \eta_{\delta}} \cdot \frac{l_p}{\eta_m}. \quad (9)$$

А для холостого хода МТА на повороте (например, «ласточкин хвост») аналогично можно использовать выражение:

$$t_x = \frac{G(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + \kappa_M B_p}{N_e \eta_{\delta}} \cdot \left(\frac{l_{xn}}{\eta_{mn}} + \frac{l_{xz}}{\eta_{mz}} \right), \quad (10)$$

где $N_{\text{вОМ}}$ – затраты мощности на привод ВОМ при холостом ходе, кВт.

Эффективная мощность двигателя может быть выражена через кинематические параметры трансмиссии

$$N_e = M_e \frac{\omega_k}{i_m} \eta_m, \quad (11)$$

где M_e – эффективный крутящий момент, Нм; ω_k – угловая скорость вращения ведущего колеса, м/с; i_m – передаточное отношение трансмиссии.

Из полученных выражений видно, что к основным регулируемым параметрам, влияющим на скорость перемещения МТА, можно отнести:

- передаточные числа прямой $i_{\text{тп}}$ и задней $i_{\text{тз}}$ передач;
- КПД трансмиссии прямой $\eta_{\text{тп}}$ и задней $\eta_{\text{тз}}$ передач;
- периодическую передачу мощности на привод ВОМ $N_{\text{вОМ}}$ и КПД $\eta_{\text{вОМ}}$.

Для описания способа автоматического управления этими параметрами на агроландшафте приведена функционально-технологическая схема роботизированного МТА (рис. 1).

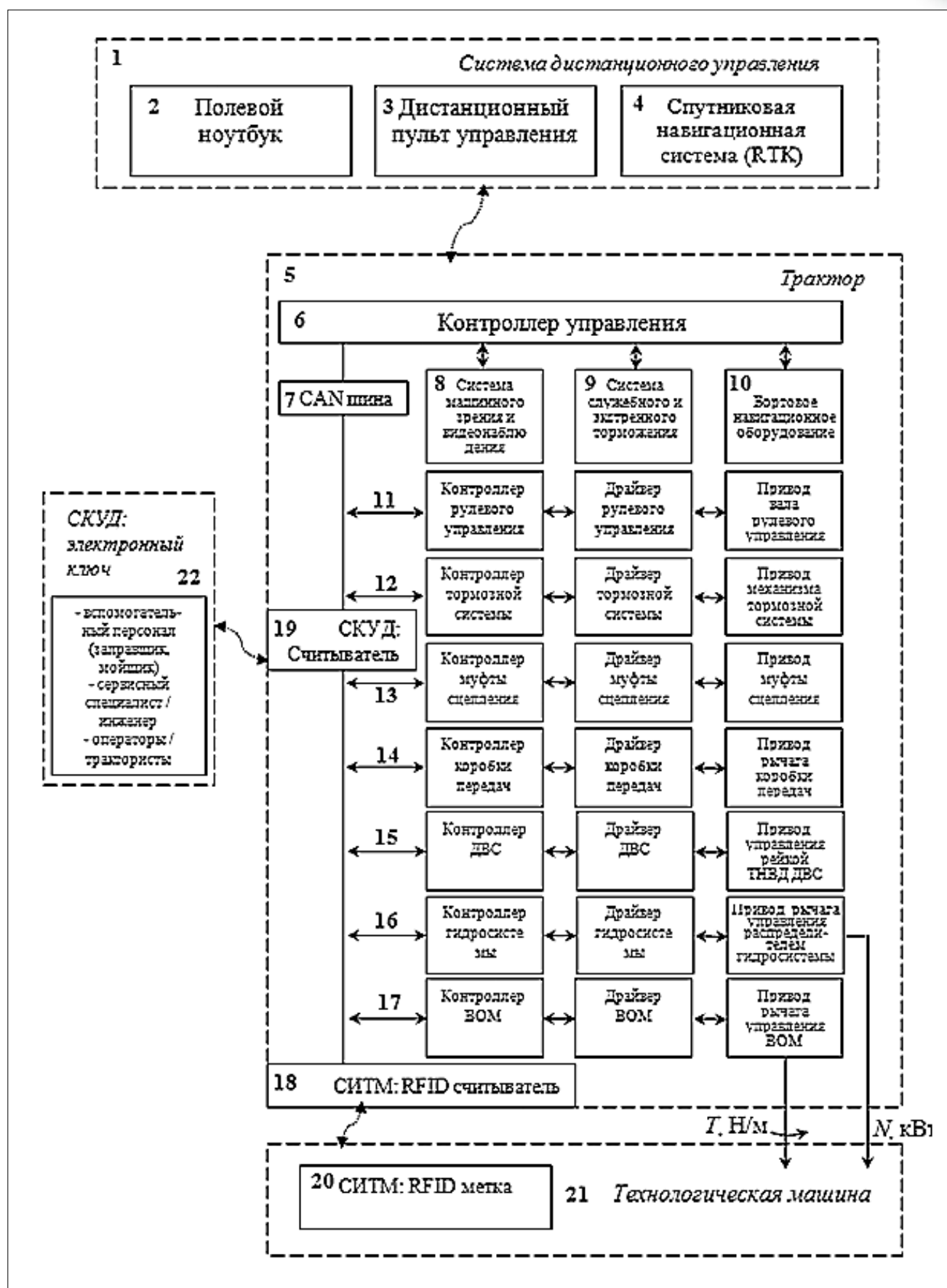


Рис. 1. Функционально-технологической схемы МТА

Fig. 1. Functional and technological diagram of the machine-tractor unit

Обозначения к *таблице 1*: 1 – система дистанционного управления; 2 – полевой ноутбук; 3 – дистанционный пульт управления; 4 – спутниковая навигационная система; 5 – трактор; 6 – контроллер управления; 7 – CAN-шина; 8 – система машинного зрения и видеонаблюдения; 9 – система служебного и экстренного торможения; 10 – бортовое навигационное оборудование; 11 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод вала рулевого управления; 12 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод механизма тормозной системы; 13 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод муфты сцепления; 14 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод рычага коробки перемены передач; 15 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод управления рейкой топливного насоса высокого давления (ТНВД) двигателя внутреннего сгорания (ДВС); 16 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод рычага управления распределителем гидравлической системы; 17 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод рычага управления вала отбора мощности (ВОМ); 18 – *RFID* считыватель; 19 – считыватель системы контроля и управления доступом (СКУД) к РМТА; 20 – *RFID* метка на корпусе технологической машины; 21 – технологическая машина; 22 – электронный ключ СКУД на руках эксплуатирующих лиц

Машинно-тракторный агрегат состоит из системы дистанционного управления, трактора, системы контроля и управления доступом (СКУД) к МТА и технологической машины.

Внешний режим за счет передачи сигналов системы дистанционного управления с пульта реализован следующим образом. Если водитель (оператор) находится на расстоянии до 40 км от РМТА для обеспечения радиосвязи, система позволяет держать стабильную передачу информации на расстояние 15-20 км. Применяя пульт, оператор обеспечивает функционирование РМТА, т.е. формирует команды на включение мехатронного привода движения управляющих звеньев агрегатов и узлов.

В таком режиме рекомендуется, чтобы трактор находился в зоне видимости или шаговой доступности от оператора. При большем расстоянии дополнительно используются размещенная в кабине камера *BOSCAM Explorer HD19 Plus*. Эта 5-мегапиксельная камера позволяет снимать с качеством *Full 1080P HD* (1920×1080) до 30 кадров в секунду с углом обзора 146 град. Используются *VR*-очки *Skyzone SKY03 Oled* (1024×768) с ярким цветом и высокой контрастностью, что позволяет оператору видеть больше деталей и красок, а новый оптический элемент делает картинку кристально чистой, без искажений и размытости.

Например, оператор путем нажатия кнопок и управления стиками пульта управления последовательно передает информацию через радиointерфейс на контроллер управления МТА. По *CAN*-шине информация последовательно направляется на контроллеры систем управления. При запуске двигателя оператор нажимает кнопку «Выжать сцепление» и информация передается на контроллер муфты сцепления → драйвер муфты сцепления → привод муфты сцепления, который выжимает педаль сцепления. Далее оператор нажимает кнопку «Запуск двигателя», сигнал подается на контроллер двигателя и замыкается контакт на его запуск, контакт приходит в положение «Работа». Устанавливаются обороты ДВС в течение некоторого времени, оператор на экране контролирует показания приборов по обратной связи.

После прогрева охлаждающей жидкости для начала движения оператор нажимает на стик пульта «Управление навеской» и программа передает сигнал на контроллер управления. По *CAN*-шине информация направляется на контроллер гидросистемы → драйвер гидросистемы → привод гидросистемы для подъема навесного оборудования (например, косилки). Оператор нажимает на стик «Тормозная система», сигнал направляется на контроллер тормозной системы → драйвер тормозной системы → привод тормозной системы, который отключает стояночный тормоз. После нажатия на кнопку «Выжать сцепление» сигнал направляется на контроллер муфты сцепления → драйвер муфты сцепления → привод муфты сцепления, выжимает педаль сцепления.

Аналогичным образом осуществляются остальные команды и действия.

Результаты и обсуждение. Согласно полученной функционально-технологической схемы МТА необходимо теоретически обосновать конструктивно-технологические параметры универсальных мехатронных модулей [15], устанавливаемых на механические органы управления оператора для приводов систем управления. Структурная схема и общий вид универсального мехатронного модуля привода управления системы включения сцепления, как пример, показан на *рисунке 2*.

В разработанных универсальных мехатронных модулях используется винтовая передача. Передаточное отношение винтовой передачи для узла управления системой тормоза и сцепления находится по формуле:

$$i = \frac{\pi d}{s}, \quad (12)$$

где d – диаметр окружности, по которой перемещается точка приложения силы, м; s – ход винта, м.

Ход винта:

$$s = t \cdot k, \quad (13)$$

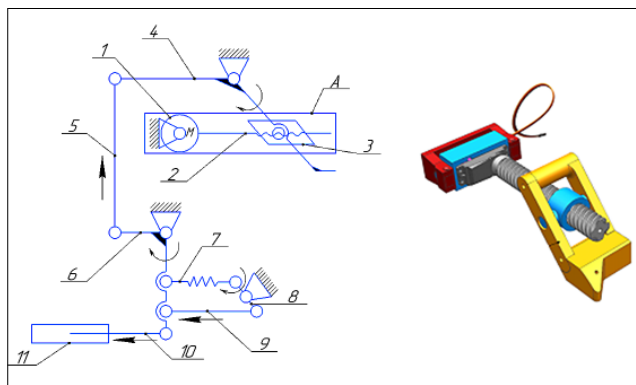


Рис. 2. Мехатронный модуль привода управления системы включения сцепления: 1 – сервопривод; 2 – винт; 3 – гайка с шарниром; 4, 6, 9 – коромысла; 5, 8 – шарниры; 7 – пружина; 10 – шток; 11 – пневмоцилиндр; А – мехатронный модуль воздействия

Fig. 2. Mechatronic drive module for the clutch engagement control system: 1 – servomotor; 2 – lead screw; 3 – nut with joint; 4, 6, 9 – rocker arms; 5, 8 – joints; 7 – spring; 10 – connecting rod; 11 – pneumatic cylinder; A – mechatronic actuation module

где t – шаг резьбы, м; k – число заходов резьбы.

Скорость перемещения гайки по винту для винтовой передачи

$$V_z = n_{\text{в}} k t, \quad (14)$$

где $n_{\text{в}}$ – частота вращения ходового винта.

Известно, что за 0,13 секунды при 8,4 В винт совершает поворот на 60° . При данном напряжении достигается наиболее высокая эффективность работы сервопривода. После подстановки данных $k=4$, частота вращения ходового винта равна 79 об/мин, получим $3,4$, $s = 28$ мм, 8848 мм/мин.

По выявленным зависимостям определены рациональные конструктивно-технологические параметры разрабатываемого мехатронного модуля воздействия. На основании сконструированных сборочных единиц была построена общая сборочная 3D модель узлов, отвечающих за управление приводами сцепления и тормоза (см. рис. 2).

Предварительные опыты успешно проведены на территории Чувашского НИИСХ – филиала ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока. Фрагмент тестирования системы автоматизированного МТА с косилкой представлен на рисунке 3.

Сравнительные экспериментальные исследования с оператором и в беспилотном режиме (с применением мехатронных приводов) проводились при выполнении операции кошения травы машинно-тракторным агрегатом ЛТЗ-120Б + КРН-2,4 при прямолинейном движении.

Предварительные исследования роботизированного машинотракторного агрегата показали, что значения эксплуатационных показателей при рабо-



Рис. 3. Тестирования системы автоматизированного МТА с косилкой

Fig. 3. Field testing of the automated machine-tractor unit equipped with a mower

те с косилкой находятся в допустимых пределах, например, производительность за 1 ч основного времени составила 3,56 га, рабочая скорость движения – $10 \pm 0,3$ км/ч, высота среза травы – 8 ± 1 см.

Выводы. Разработан автоматизированный сельскохозяйственный машинно-тракторный агрегат с использованием универсальных мехатронных модулей систем управления для скашивания трав. Агрегат состоит из системы дистанционного управления, трактора, системы контроля и управления доступом к МТА и технологической машины. Описана методика автоматического управления МТА на агроландшафте. Выполнено теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров универсальных мехатронных модулей для управления сцеплением и тормозной системой. Проведен расчет механизма мехатронного модуля и определены: передаточное отношение винтовой передачи, ход винта и скорость перемещения гайки. Разработано программное обеспечение на языке программирования для контроллера управления универсальными мехатронными модулями. Дистанционным способом, используя пульт оператора, реализовали автоматическое управление колесного трактора ЛТЗ-120Б и роторной косилки КРН-2,4 на агроландшафте. Провели полевое тестирование взаимодействия программы с аппаратной частью универсальных мехатронных модулей систем управления МТА. Сравнительные экспериментальные исследования с оператором и в автоматическом режиме (с применением мехатронных приводов) проведены при выполнении операции кошения травы машинно-тракторным агрегатом при прямолинейном движении. Предварительные исследования автоматизированного сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата показали, что значения эксплуатационных показателей при работе с косилкой находятся в допустимых пределах, например производительность за 1 час основного времени составила 3,56 га, рабочая скорость движения – $10 \pm 0,3$ км/ч, а высота среза трав – 8 ± 1 см.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ren X., Huang B., Yin H. A review of the large-scale application of autonomous mobility of agricultural platform. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. 206. 107628. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107628.
- Noguchi N. Agricultural vehicle robot. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2018. 30(2). 165-172. DOI: 10.20965/jrm.2018.p0165.
- Bochtis D.D., Sorensen C.G.C., Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosyst. Eng.* 2014. 126. 69-81. DOI: 10.1016/j.biosystem-seng.2014.07.012.
- Plessen M.G., Bemporad A. Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines. *Biosyst. Eng.* 2017. 153. 28-41. DOI: 10.1016/j.biosystem-seng.2016.10.019.
- Bai Y. et al. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. 205. 107584. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107584.
- Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Беспилотное мобильное энергосредство сельскохозяйственного назначения // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N10. С. 41-44. EDN: WWHVXJ.
- Liu L. et al. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect. *Expert Syst. Appl.* 2023. 227. 120254. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120254.
- Alberto-Rodriguez A. et al. Review of control on agricultural robot tractors. *Int. J. Comb. Optim. Probl. Inform.* 2020. 11. 9-20.
- Heikkilä M. et al. Unmanned agricultural tractors in private mobile. *Networks*. 2022. 2. 1-20. DOI: 10.3390/network2010001.
- Ненайденко А.С., Поддубный В.И., Валекжанин А.И. Моделирование управления движением колесной сельскохозяйственной машины в режиме реального времени // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. N3. С. 32-38. EDN: XSEMKD.
- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68. EDN: GBEQZI.
- Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Старовойтов С.И., Кынев Н.Г. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4 (33). С. 150-156. EDN: YTHPID.
- Yin X., Du J., Geng D., Jin C. Development of an automatically guided rice transplanter using RTK-GNSS and IMU. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51. 374-378. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.193.
- Han J.-H. et al. Performance evaluation of an autonomously driven agricultural vehicle in an orchard environment. *Sensors*. 2021. 22. 114. DOI: 10.3390/s22010114.
- Qiao N. et al. An improved path-tracking controller with mid-angle adaptive calibration for combine harvester. *J. Instrum.* 2020. 15. P1025. DOI: 10.1088/1748-0221/15/01/P01025.
- Васильев С.А., Васильев А.А., Затылков Н.И. Противозероизонная контурная обработка почвы машинно-тракторными агрегатами на агроландшафтах склоновых земель // *Вестник НГИЭИ*. 2018. N 5 (84). С. 43-54. EDN: XNDFZR.
- Годжаев З.А., Шевцов В.Г., Лавров А.В. и др. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (Прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. N4(137). С. 220-229. EDN: DMOGNR.
- Blok P. et al. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269. DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.046.
- Kim D. H. et al. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51-17. 227-231. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.149. (In English).
- Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Хорошенков В.К. и др. Оптимизация управления технологическими процессами в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 4-11. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
- Кряжков В.М., Годжаев З.А., Шевцов В.Г. и др. Проблемы формирования инновационного парка сельскохозяйственных тракторов России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N3. С. 9-14. EDN: TTLVRR.

REFERENCES

- Ren X., Huang B., Yin H. A review of the large-scale application of autonomous mobility of agricultural platform. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. 206. 107628 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2023.107628.
- Noguchi N. Agricultural vehicle robot. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2018. 30(2). 165-172 (In English). DOI: 10.20965/jrm.2018.p0165.
- Bochtis D.D., Sorensen C.G.C., Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosyst. Eng.* 2014. 126. 69-81(In English). DOI: 10.1016/j.biosystem-seng.2014.07.012.
- Plessen M.G., Bemporad A. Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines. *Biosyst. Eng.* 2017. 153. 28-41 (In English). DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.019.
- Bai Y. et al. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: A review.

- Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. 205. 107584 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2022.107584.
6. Gojaev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Unmanned mobile power unit for agricultural purposes. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016. N10. 41-44 (In Russian). EDN: WWHVXJ.
 7. Liu L. et al. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect. *Expert Syst. Appl.* 2023. 227. 120254 (In English). DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120254.
 8. Alberto-Rodriguez A. et al. Review of control on agricultural robot tractors. *Int. J. Comb. Optim. Probl. Inform.* 2020. 11. 9-20 (In English).
 9. Heikkilä M. et al. Unmanned agricultural tractors in private mobile. *Networks*. 2022. 2. 1-20 (In English). DOI: 10.3390/network2010001.
 10. Nenajdenko A.S., Poddubnyj V.I., Valekzhanin A.I. modeling the movement control of a wheeled agricultural machine in real time. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018. N3. 32-38 (In Russian). EDN: XSEMKD.
 11. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.A.P., Tsench Yu.S., et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
 12. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M. et al. Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian). EDN: YTHPID.
 13. Yin X., Du J., Geng D., Jin C. Development of an automatically guided rice transplanter using RTK-GNSS and IMU. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51. 374-378 (In English). DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.193.
 14. Han J.-H. et al. Performance evaluation of an autonomous-ly driven agricultural vehicle in an orchard environment. *Sensors*. 2021. 22. 114 (In English). DOI: 10.3390/s22010114.
 15. Qiao N. et al. An improved path-tracking controller with mid-angle adaptive calibration for combine harvester. *J. Instrum.* 2020. 15. P1025 (In English). DOI: 10.1088/1748-0221/15/01/P01025.
 16. Vasilyev S.A., Vasilyev A.A., Zatytkov N. Anti-erosion contour tillage machine-tractor units on the agricultural landscapes of sloping land. *Vestnik NGIEHI*. 2018. N5 (84). 43-54 (In Russian). EDN: XNDFZR.
 17. Godzhaev Z.A., Shevtsov V.G., Lavrov A.V. et al. strategy of russian agricultural machinery modernization until 2030 (forecast). *Machinery Technical Service*. 2019. N4(137). 220-229 (In Russian). EDN: DMOGMR.
 18. Blok P. et al. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.046.
 19. Kim D.H. et al. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51-17. 227-231 (In English). DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.149.
 20. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Khoroshenkov V.K. et al. Optimization of technological process management in plant growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. 4-11 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
 21. Kryazhkov V.M., Godzhaev Z.A., Shevtsov V.G. et al. Problems of formation of russian innovative agricultural tractors fleet. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N3. 9-14 (In Russian). EDN TTLVRR.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

- З.А. Годжаев – постановка задачи, обоснование математических моделей и технический средств;
 С.А. Васильев – формулирование основной концепции исследования, разработка методологии исследования, формирование выводов;
 С.А. Мишин – графическое представление результатов, описание результатов и формирование выводов исследования;
 Е.В. Рузанов – подготовка начального варианта текста, анализ литературы.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

- Godzhaev Z.A. – problem statement, substantiation of mathematical models and technical means;
 Vasiliev S.A. – development of the main research concept, research methodology design, formulation of conclusions;
 Mishin S.A. – graphical representation and description of the results, formulation of conclusions;
 Ruzanov E.V. – preparation of the initial manuscript draft, literature review.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

16.10.2024

27.05.2025