Оригинальное исследование
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-633037 EDN: UTGAQZ

Аппаратно-программный комплекс для системы параллельного вождения машинно-тракторного агрегата

Р.Р. Галиуллин

Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Высокая стоимость импортного информационно-навигационного и подруливающего оборудования вынуждает отечественных производителей создавать и внедрять конкурентоспособные технологии, которые основаны на достижениях науки и техники. Поэтому разработка и создание отечественных систем параллельного вождения машинно-тракторного агрегата с информационно-навигационным оборудованием, являются актуальными.

Цель работы — разработка и создание отечественного аппаратно-программного комплекса для параллельного вождения машинно-тракторного агрегата.

Материалы и методы. Испытания аппаратно-программного комплекса проводились на полях Республики Башкортостан по разработанной учёными ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ методике проведения производственно-тестовых испытаний.

Результаты. Испытания экспериментального аппаратно-программного комплекса на полях Республики Башкортостан показали снижение пропусков и перекрытий на 15–25% от площади полей, экономию удобрений до 20% на га, увеличилась производительность выполнения полевых работ на 13–20 %, за счёт концентрации внимания механизатора только на управление трактором (нет необходимости ориентироваться на предыдущий гон). При выполнении работ ночью производительность агрегата, как при штатном и экспериментальном вариантах увеличивалась в 1,5–1,8 раза, по отношению к выработке в светлое время суток, что, в итоге, привело к сокращению сроков выполнения полевых работ.

Заключение. Практическая ценность разработки заключается в возможности использования предложенного автором аппаратно-программного комплекса для параллельного вождения отечественных машинно-тракторных агрегатов.

Ключевые слова: информационно-навигационное и подруливающее оборудование; аппаратно-программный комплекс; приложение; электронный блок управления; машинно-тракторный агрегат; полевые испытания.

Как цитировать:
Галиуллин Р.Р. Аппаратно-программный комплекс для системы параллельного вождения машинно-тракторного агрегата // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 1. С. 49–56. DOI: 10.17816/0321-4443-633037 EDN: UTGAQZ

Рукопись получена: 31.05.2024 **Рукопись одобрена:** 18.03.2025 **Опубликована online:** 18.03.2025

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

Original Study Article
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-633037 EDN: UTGAQZ

Hardware-software facility for the assisted steering system of a machine-tractor unit

Rustam R. Galiullin

Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The high cost of imported information, navigation and steering equipment forces domestic manufacturers to create and to implement competitive technologies that are based on the achievements of science and technology. Therefore, the development and creation of domestic systems for assisted steering of a machine-tractor unit with information and navigation equipment is relevant.

AIM: Development and creation of a domestic hardware-software facility for assisted steering of a machine-tractor unit.

METHODS: Tests of the hardware-software facility were carried out on the fields of the Republic of Bashkortostan according to the methodology for conducting in-process tests developed by scientists of the Bashkir State Agrarian University.

RESULTS: Tests of the experimental hardware-software facility on the fields of the Republic of Bashkortostan showed a reduction in gaps and overlaps by 15-25% of the field area, savings in fertilizers of up to 20% per hectare, productivity of field work increased by 13-20% due to the machine operator's attention focusing only on tractor control (no need to focus on the previous run). When operating at night, the productivity of the unit, both in default and experimental versions, increased by 1.5-1.8 times in relation to output during daylight hours, and as a result, the time required to complete the fieldwork was reduced.

CONCLUSION: The practical value of the solution lies in the possibility of using the hardware-software facility proposed by the author for assisted steering of domestic machine-tractor units.

Keywords: information navigation and steering equipment; hardware-software facility; application; electronic control unit; machine-tractor unit; field tests.

To cite this article:
Galiullin RR. Hardware-software facility for the assisted steering system of a machine-tractor unit. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2025;92(1):49–56. DOI: 10.17816/0321-4443-633037 EDN: UTGAQZ

Received: 31.05.2024 **Accepted:** 18.03.2025 **Published online:** 18.03.2025

moscow polytech
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2025
ECO•VECTOR

ВВЕДЕНИЕ

Высокая точность выполнения полевых работ машинно-тракторным агрегатом (МТА) достигается благодаря применению дорогостоящего импортного информационно-навигационного и подруливающего оборудования [1]. Так, например, стоимость всего лишь комплекта курсоуказателя Trimble на платформе Android с навигационным оборудованием составляет порядка 500–700 тыс. руб., а с подруливающим устройством цена подскакивает до 1 млн руб. [2, 3]. В то же время на отечественном рынке имеются аппаратно-программные комплексы (АПК) для систем параллельного вождения и стоимостью до 250 тыс. руб., что в значительной степени можно объяснить использованием низкокачественного информационно-навигационного оборудования.

С учётом вышесказанного, и, основываясь на Федеральной научно-технической программе развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы, предусматривающей создание и внедрение конкурентоспособных отечественных технологий, которые основаны на достижениях науки, можно утверждать, что вопросы разработки и создания отечественного АПК для параллельного вождения машинно-тракторного агрегата являются актуальными задачами.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является разработка и создание отечественного АПК для параллельного вождения МТА.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи:

- по результатам проведённых теоретических исследований [4] разработать и создать отечественный АПК для системы параллельного вождения МТА;
- провести полевые исследования предложенного АПК.

Объект исследования — АПК для системы параллельного вождения.

Предмет исследования —– точность вождения МТА.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По результатам теоретических исследований [4] и анализа существующих АПК как зарубежного, так и отечественного производства разработана система для параллельного вождения с подруливающим электроприводом (рис. 1).

Основными элементами системы являются планшет с платформой Android, GPS/GLONASS приёмник с антенной, микропроцессорный блок управления (МБУ) и подруливающее устройство с электроприводом (ПУЭП). Платформа Android была принята из-за дешевизны работающих на ее базе мобильных устройств, в т.ч. планшетов, что позволяет быструю их замену в случае поломки и имеет огромное значение в период полевых работ. Более высокая точность построения трека комплексом, следовательно, и вождения МТА достигается за счёт использования внешнего вычислительного модуля на базе STM32F3 с датчиками наклона и ориентации. Для повышения надежности системы и снижения стоимости АПК в целом, информация о наклонах и ориентации МТА может быть получена также из внутренних ресурсов аппаратной части планшета.

Измерение угла поворота колёс МБУ достигается аналоговым датчиком угла поворота рулевого колеса (рис. 1). Аналоговый сигнал с этого датчика предварительно оцифровывается 12 разрядным АЦП, далее обрабатывается в модуле с двухъядерным процессором Tensilica Xtensa [5]. В МБУ заложен также алгоритм, предусматривающий, в случае необходимости использование вместо аналогового датчика абсолютный энкодер.

Обмен данными между планшетом и МБУ ПУЭП и GPS/GLONASS приёмником обеспечивается посредством Wi-Fi и Bluetooth модулей соответственно. Передача данных по Bluetooth осуществляется на скорости 115200 бод [6].

На рис. 2 представлена объектно-ориентированная модель АПК, описывающая его работу. Здесь, после запуска механизатором (клиентом) приложения, установленного на планшете с платформой Android, команды (сообщения) внутри функции *Loop* выполняются циклически. Приложение отправляет запрос на приёмник GPS/GLONASS через модуль Bluetooth, получает координаты МТА, корректирует их с учётом наклона МТА. Далее, в зависимости от выбранного курса, подпрограмма, заложенная в приложение, рассчитывает отклонение МТА от курса и передаёт эту информацию на МБУ ПУЭП. Последнее в свою очередь получает от датчика угла поворота передних колёс текущий угол поворота, с учётом отклонения МТА рассчитывает и реализует необходимый угол поворота передних колёс посредством ПУЭП.

В качестве подруливающего устройства из-за доступности на момент проведения исследований, была принята часть привода руля фирмы Raven (США) с многомоментным электродвигателем GNM 2145 и редуктором. Для управления электродвигателем использовался электронный блок PLDC 2080 компании PureLogic R&D, который совместно с модулем ESP32 по Wi-Fi получал команды с планшета.

На рис. 3 представлен стендовый вариант АПК.

GPS/GLONASS приёмник собран на базе OEM платы OEMStar-10Hz-G. Преимуществом данной платы является наличие технологии GLIDE, компактность, малое энергопотребление, поддержка API функций.

Приложение с графическим интерфейсом для параллельного вождения МТА выполнено в нескольких вариантах. На рис. 4 представлен вариант приложения, выполненный в среде разработки Android Studio с использованием графической библиотеки для встраиваемых систем OpenGL ES [7]. Видеоролики с демонстрацией работы приложения и результаты отдельных испытаний представлены на личном сайте автора https://kompas-rus.ru в разделе «Мобильное приложение».

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-633037

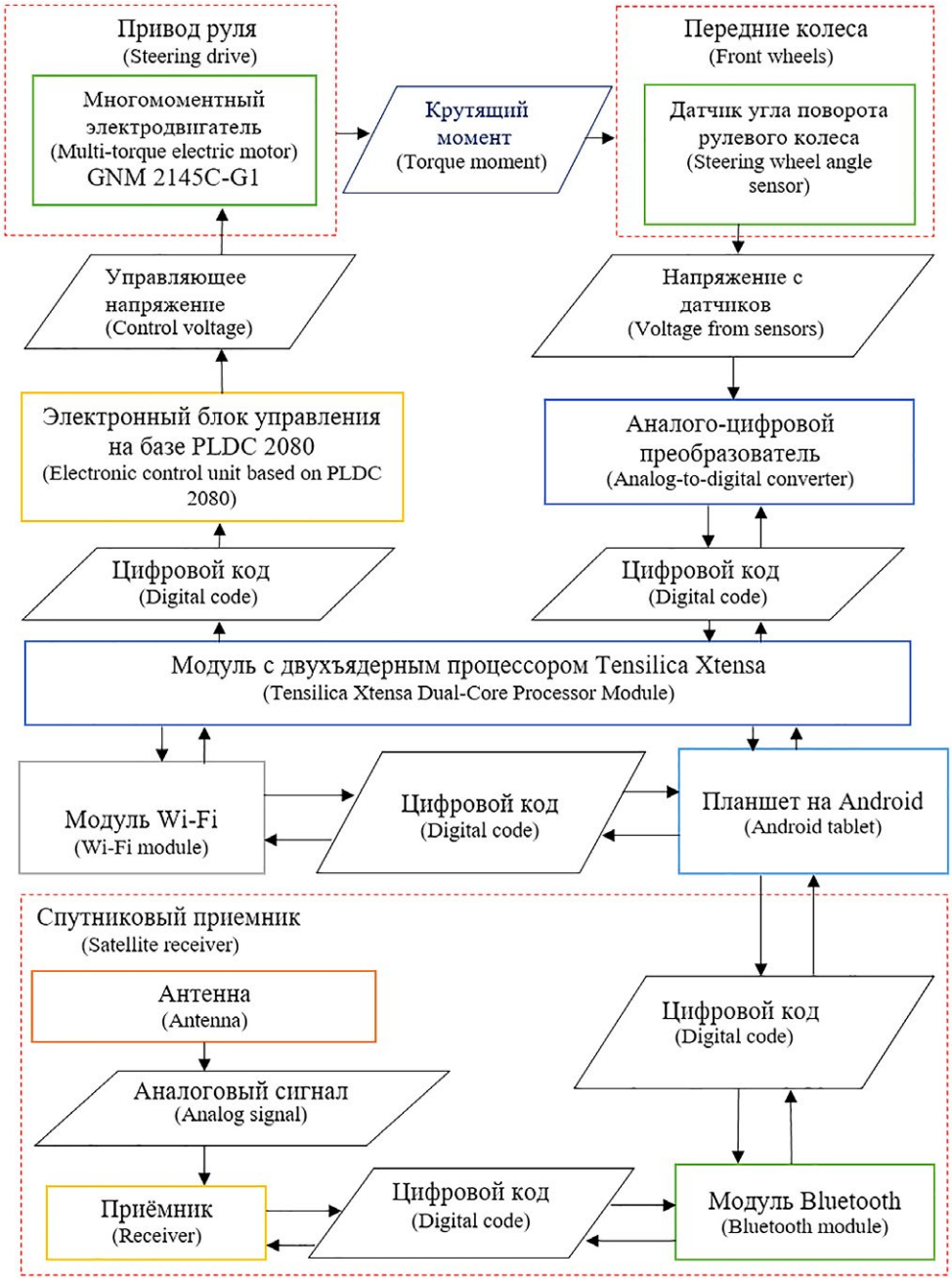

Рис. 1. Функциональная схема АПК для системы параллельного вождения машинно-тракторного агрегата (МТА).
Fig. 1. Block diagram of the hardware-software facility for the assisted steering system of a machine-tractor unit.

Окончательный вариант МБУ для управления ПУЭП выполнен на базе микроконтроллера STM32F3. Обмен информацией между микроконтроллером и датчиками наклона и ориентации осуществлялся по интерфейсу SPI. Жёсткое реальное время при реализации параллельного вождения обеспечивается посредством операционной системы реального времени FreeRTOS [8].

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ АПК

Первоначальные полевые испытания ПАК проводились на тракторах МТЗ-82 и John Deere с монтированием спутниковой антенны на крыше и капоте тракторов. След за трактором на поле (рис. 5, *a*) вычерчивался опущенным прицепным устройством (см. рис. 5, *b*).

На рис. 6 представлены фотографии испытаний АПК и получаемые треки на полях Республики Башкортостан: на тракторах МТЗ-82, John Deere и самоходной машине Туман-2.

Отдельные испытания АПК проводились на поле при внесении минеральных удобрений самоходным разбрасывателем «Туман-2» [9]. АПК сравнивался с встроенной в самоходную машину системой параллельного вождения с подруливающим устройством Teejet Matrix Pro 570GS [10]

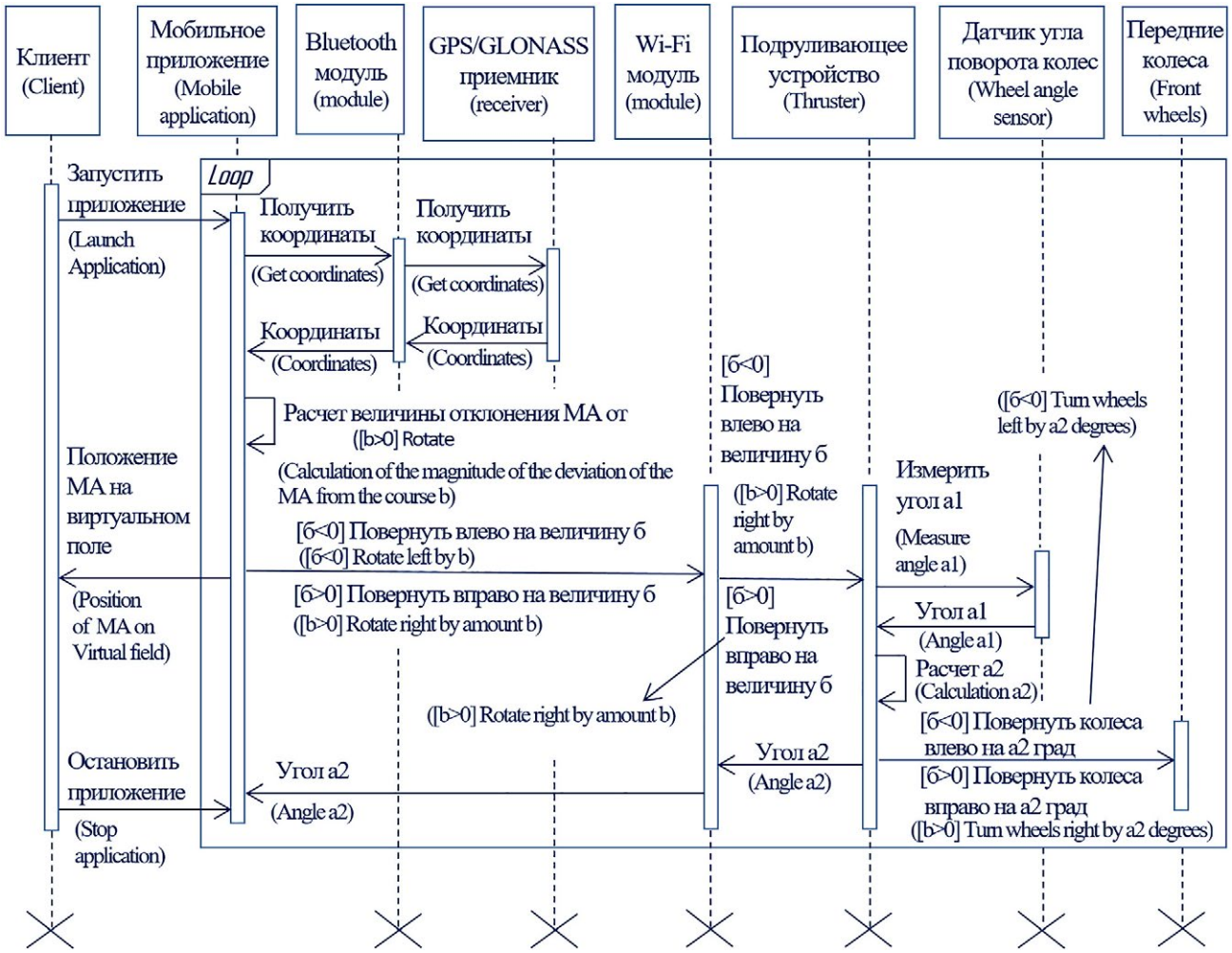

Рис. 2. Диаграмма, описывающая последовательность работы аппаратно-программного комплекса (АПК).
Fig. 2. Block diagram describing operational sequence of the hardware-software facility.

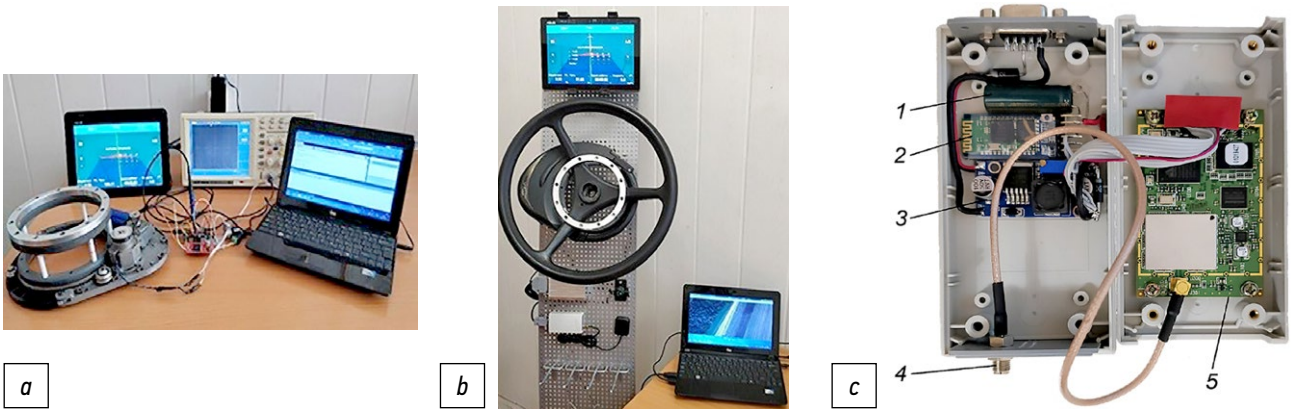

Рис. 3. Стендовый вариант аппаратно-программного комплекса (АПК): *a* — вид комплекса с разобранным электроприводом базе многомоментного электродвигателя GNM 2145 C-G1 с редуктором и электронно-управляемой муфтой (производства Германия); *b* — стендовый вариант собранного комплекса; *c* — электронный блок приёмника спутниковых сигналов на базе OEMStar-10Hz-G с открытой крышкой корпуса (*1* — конденсатор; *2* — HC-05; *3* — преобразователь напряжения; *4* — разъём SMA; *5* — приёмник OEMStar-10Hz-G).
Fig. 3. The bench version of the hardware-software facility: *a* — view of the facility with a disassembled electric drive based on the GNM 2145 C-G1 multitorque electric motor with a reduction gar and electronically-controlled clutch (manufactured in Germany); *b* — the bench version of the assembled facility; *c* — electronic control unit of the receiver of satellite signals based on the OEMStar-10Hz-G with the opened housing cap (*1* — a capacitor; *2* — the NS-05; *3* — a voltage transducer; *4* — the SMA input; *5* — the OEMStar 10Hz-G receiver).

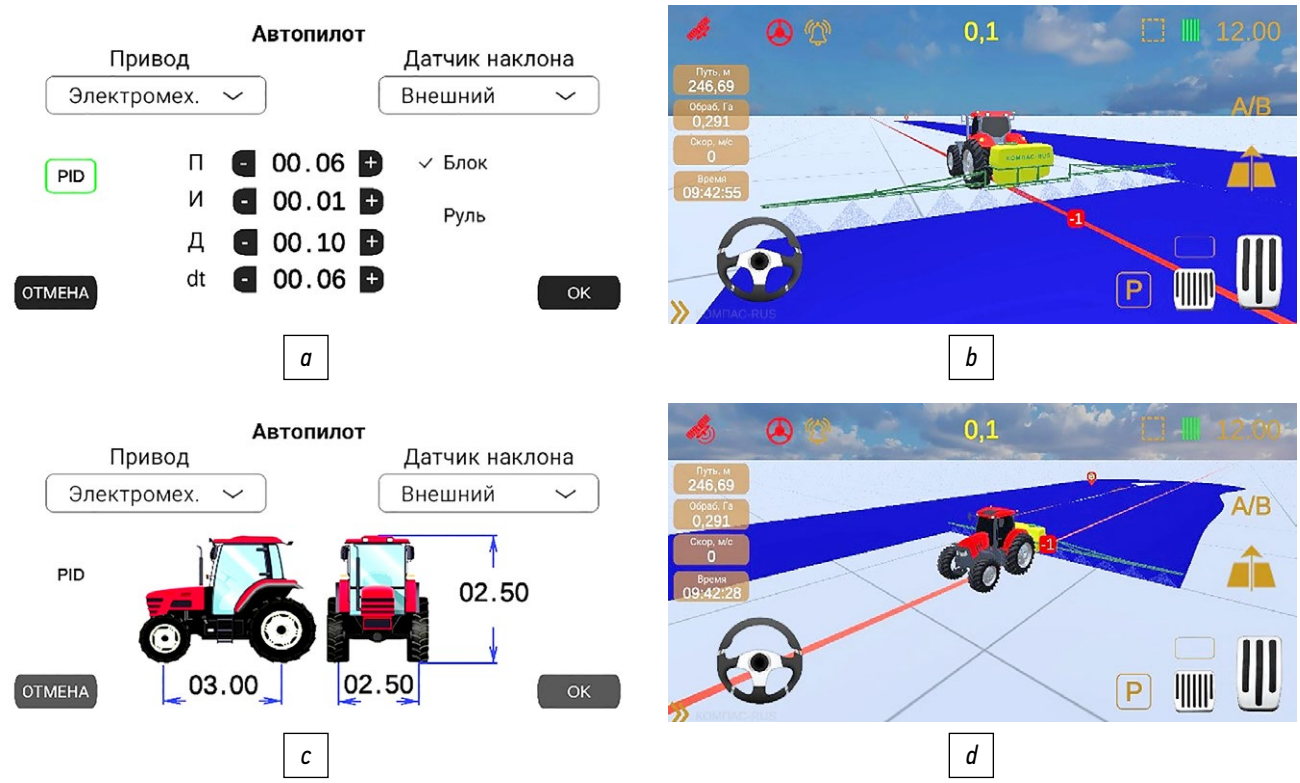

Рис. 4. Интерфейс приложения для параллельного вождения машинно-тракторного агрегата (МТА): *a, c* — подменю настройки автопилота; *b, d* — 3D визуализация МТА.
Fig. 4. Interface of the application for assisted steering of a machine-tractor unit: *a, c* — submenu for autopilot settings; *b, d* — 3D visualization of MTA.

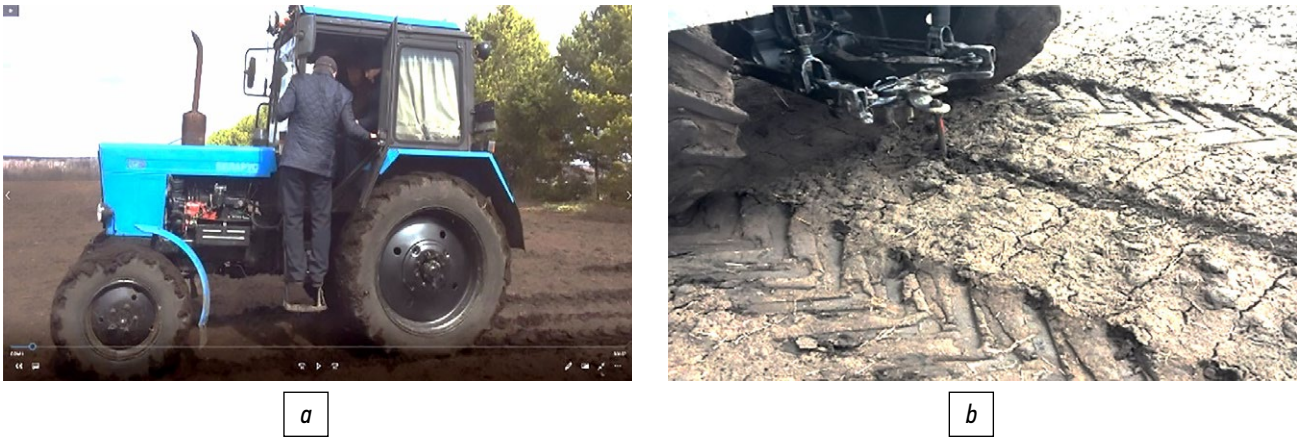

Рис. 5. Трактор МТЗ-82 с экспериментальным аппаратно-программным комплексом (АПК) (*a*) и процесс измере-ния точности создаваемого аппаратно-программного комплекса (АПК) трека и следа заданной ширины с опущенным прицепным устройством (*b*).
Fig. 5. The MTZ-82 with the experimental hardware-software facility (*a*) and the process of measuring the accuracy of the track created by the hardware-software facility and the trace of a given width with the lowered drawbar hitch (*b*).

(производства США). При этом, одновременно со штатной системой записывался трек, и на экране планшета визуализировалась текущая информация (трек шириной захвата 20 м, текущие значения пройдённого пути, времени с начала обработки, скорости движения).

Перед началом работы в бункер самоходной машины «Туман-2» было загружено 1680 кг удобрений в расчёте на 16 га. Всё имеющееся в бункере удобрение было израсходовано в момент индикации на экране планшета АПК обработанной площади 16,06 Га. Эти же значения отображались на штатной системе самоходной машины «Туман-2».

При проведении испытаний самоходная машина заправлялась удобрениями на краю поля, поэтому после каждого израсходования удобрений приходилось удаляться с места работы. Место завершения предыдущей обработки АПК находил без ошибок (как и штатная система), после чего разбрасывание удобрений было продолжено с конечного местоположения.

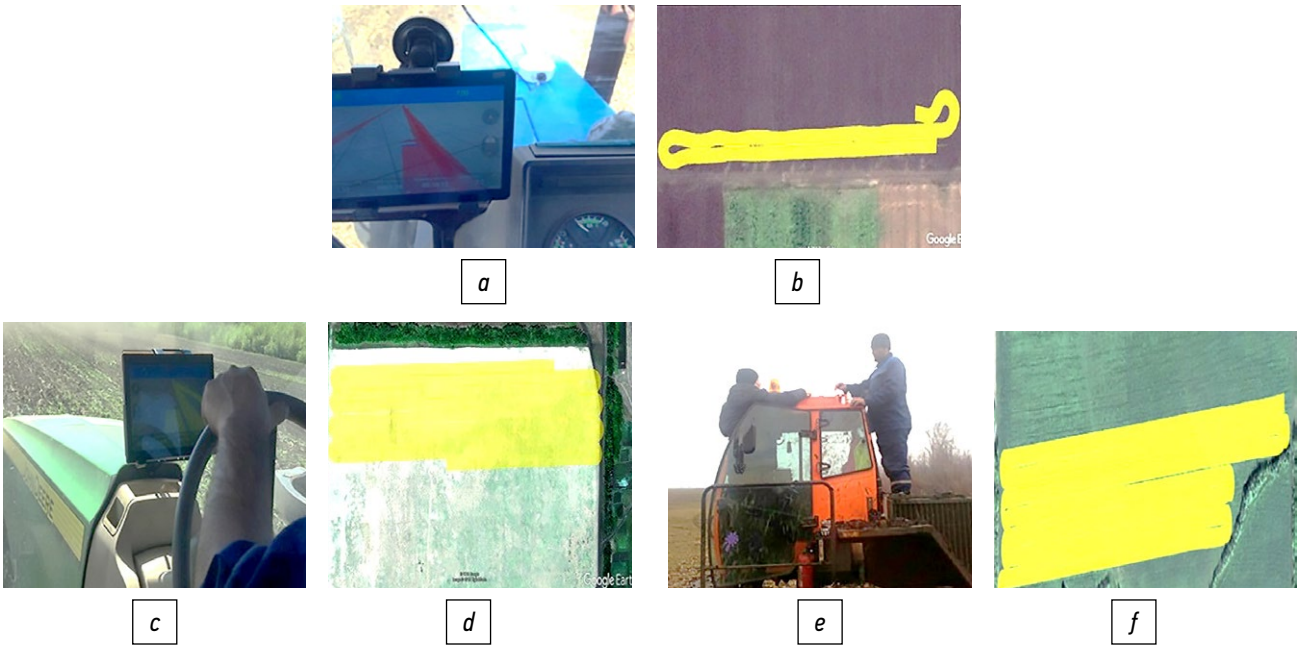

Рис. 6. Испытания аппаратно-программного комплекса (АПК) на полях Республики Башкортостан: *a, c, e* — на тракторах МТЗ-82, John Deere и самоходной машине Туман-2; *b, d, f* — треки обработанных участков по-ля на карте Google.
Fig. 6. Testing of the hardware-software facility on the fields of the Republic of Bashkortostan: *a, c, e* — with the MTZ-82 and the John Deere tractors and the Tuman-2 self-propelled vehicle; *b, d, f* — tracks of the treated field areas on the Google Maps.

В ходе сравнительных испытаний при выполнении технологического процесса внесения минеральных удобрений показатели выработки агрегата определялись одновременно штатным устройством Teejet и экспериментальной системой. При этом АПК определены следующие параметры работы агрегата: трек шириной захвата 20 метров с отклонениями не более 10 см, пройдённый путь при разбрасывании удобрений составил 8,0 км, выработка агрегата — 16,06 га, время работы агрегата — 20 мин. 51 сек. После второй заправки получены следующие показатели выработки: пройдённый путь при разбрасывании составил 15,9 км, обработано 31,87 га, время работы 20 мин. 11 сек. Аналогичные показатели выработки были определены штатным устройством агрегата.

В период проведения испытаний при движении под высоковольтной линией штатная система Teejet дважды самопроизвольно отключалась и перезагружалась. Проводилась остановка агрегата и ожидание перезагрузки операционной системы. В это время предлагаемый АПК работал без сбоев.

Широкомасштабные сравнительные испытания предложенного АПК совместно с навигаторами Кампус (г. Омск) и Teejet Matrix (США) на полях Республики Башкортостан (Чишминский, Давлекановский, Зианчуринский, Уфимский и др. районы) показали, что эффективность использования агронавигаторов в сельскохозяйственной технике в большей степени оправдывается в случае применения их в составе автоматических подруливающих устройств.

На рис. 7 представлена сравнительная оценка относительной точности вождения МТА при экспериментальном

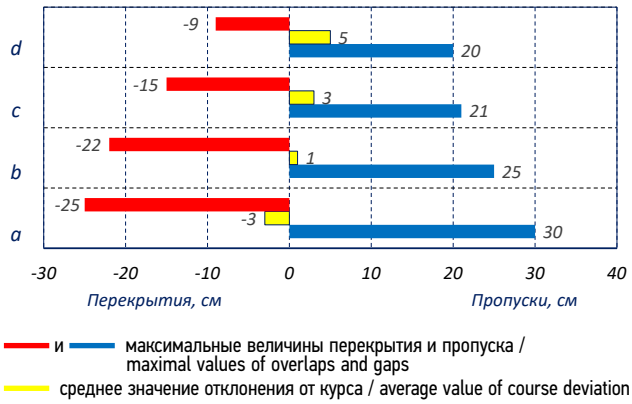

Рис. 7. Сравнительная оценка относительной точности вождения машинно-тракторного агрегата (МТА) при экспериментальном аппаратно-программном комплексе (АПК) и ручном управлении курсом с приёмниками NEO-M8N (*a*) и OEMStar (*b*) и подруливающим электроприводом и приёмником OEMStar (*c*) и штатной системой Teejet Matrix Pro 570GS (*d*).
Fig. 7. Comparative assessment of relative accuracy of machine-tractor unit steering at the experimental hardware-software facility and manual steering control with the NEO-M8N (*a*) and the OEMStar (*b*) receivers, with steering-assisting electric drive and the OEMStar receiver (*c*) and the defaulr Teejet Matrix Pro 570 GS system (*d*).

АПК и ручном управлении поворотом передних колёс трактора, подруливающим электроприводом и при использовании штатной системы Teejet Matrix Pro 570GS.

Как видно из рис. 7, при ручном управлении поворотом колёс наибольшая величина пропусков (необработанные участки поля) достигается при использовании

на экспериментальной установке спутникового приёмника NEO-M8N и составляет 30 см, что на 5 см больше, чем при OEMStar. Разница в перекрытиях обработанного участка поля в сравниваемых вариантах так же оказались незначительными, всего 3 см. Таким образом, при выполнении работ, не требующих высокой точности, например, опрыскивание, внесение гранулированных удобрений можно использовать АПК с приёмником NEO-M8N. Это позволит снизить стоимость системы примерно на 30 тыс. руб. Испытания АПК с включённым фильтром Кальмана [4, 11] позволили повысить точность обработки примерно на 17%.

ВЫВОДЫ

Сравнительные испытания экспериментального АПК с приёмником OEMStar и подруливающим устройством, а также штатным Teejet Matrix Pro 570GS показывают примерно одинаковую точность вождения МА при стоимости экспериментального АПК примерно в 5 раз ниже штатной. Максимальная разница относительной точности в 6 см при использовании этих систем оказалась лишь при перекрытии обработанного участка поля.

В целом, испытания экспериментального АПК на полях Республики Башкортостан показали снижение пропусков и перекрытий на 15–25% от площади полей, экономию удобрений до 20% на Га. Кроме того, использование навигационного оборудования совместно с ПУЭП позволяет увеличить производительность выполнения полевых работ на 13–20%, за счёт концентрации внимания механизатора только на управление трактором (нет необходимости ориентироваться на предыдущий гон). При выполнении работ ночью производительность агрегата, как при штатном и экспериментальном вариантах увеличилась в 1,5–1,8 раза, по отношению выработки в светлое время суток, и в итоге, сократились сроки выполнения полевых работ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Раскрытие интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источники финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Disclosure of interests. The author declares the absence of obvious and potential conflicts of interest.

Funding sources. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Truflyak EV. *Parallel driving systems.* Krasnodar: KubSAU; 2016.

2. Autopilot based on Trimble GFX-750 [accessed: 23.05.2024]. Available from: https://agroselena.ru/product/navigatsionnyy-displey-trimble-gfx-750

3. GFX-750 display [accessed: 23.05.2024]. Available from: https://ptxtrimble.com/en/products/hardware/displays/gfx-750-display

4. Galiullin RR. On the issue of increasing the accuracy of determining the coordinates of a machine-tractor unit using information and navigation equipment of a parallel driving system. *Tractors and agricultural machinery.* 2022;89(4):243–254. doi: 10.17816/0321-4443-105810

5. ESP32 Technical Reference Manual [accessed: 23.05.2024]. Available from: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf

6. OEMStar Installation and Operation User Manual [accessed: 23.05.2024]. Available from: https://gnssplus.ru/upload/iblock/e71/om_20000126.pdf

7. OpenGL ES [accessed: 23.05.2024]. Available from: https://developer.android.com/develop/ui/views/graphics/opengl/about-opengl

8. FreeRTOS. Real-time operating system for microcontrollers [accessed: 23.05.2024]. Available from: https://freertos.org

9. Technical characteristics of Tuman-2 [accessed: 23.05.2024]. Available from: https://asm-altay.ru/images/pdf/tum2.pdf

10. Instructions and manual for TeeJet Matrix Pro 570GS [accessed: 23.05.2024]. Available from: https://ru.manualza.com/teejet/matrix-pro-570gs/clvc1

11. Kalman Filter [accessed: 23.05.2024]. Available from: https://www.mathworks.com/discovery/kalman-filter.html

ОБ АВТОРЕ

Галиуллин Рустам Рифович,
д-р техн. наук,
профессор кафедры «Электроснабжение и автоматизация технологических процессов»;
адрес: Россия, 450001, Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34;
ORCID: 0000-0003-1031-5068;
eLibrary SPIN: 5661-1922;
e-mail: rustam6274@mail.ru

AUTHOR'S INFO

Rustam R. Galiullin,
Dr. Sci. (Engineerng),
Professor of the Power Supply and Automation of Technological Processes Department;
address: 34 50-letiya Oktyabrya st, Ufa, Russia, 450001;
ORCID: 0000-0003-1031-5068;
eLibrary SPIN: 5661-1922;
e-mail: rustam6274@mail.ru