

bluegrass seed. Iowa Agr. and Home Econ. Exp. Sta. Res. Bul. 464, 398-407.

10. Burkov A.I. Razrabotka i sovershenstvovanie pnevmosistem zernoochistitelnykh mashin: monografiya. Kirov, 2016. 380 s.

11. Drincha V.M. Napravleniya proizvodstva konkurentosposobnoy tekhniki dlya ochistki zerna i semyan / Drincha V.M., Yampilov S.S. // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 1999. No. 3-4. S. 10-12.

12. Ivanov N. M. Tekhnologii i tekhnika dlya posleuborochnoy obrabotki zerna i semyan: monografiya / N. M. Ivanov, N. I. Strikunov, S. V. Lekanov; SFNTsA RAN. – Novosibirsk: SFNTsA RAN, 2021. – 277 s.

13. Aniskin V.I. Klassifikatsiya pnevmoseparatorov zernovykh materialov / Aniskin V.I., Drincha V.M. // Dostizheniya nauki i tekhniki. 1993. No.4. S. 22-23.

14. Smelik V.A. Posleuborochnaya obrabotka zerna i semyan v usloviyakh regionov povyshennogo uvlazhneniya: monografiya / V.A. Smelik, M.A. Novikov, A.N. Perekopskiy, L.I. Eroshenko. – Sankt-Peterburg, SPbGAU, 2023. – 162 s.

15. Ulrikh N.N. Laboratornye pnevmoseparatory / Ulrikh N.N., Matveev A.S. // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sotsialisticheskogo selskogo khozyaystva. 1972. No.6. S. 50-52.



УДК 621.37

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-258-4-82-89

Р.Р. Галиуллин, З.Р. Юлмухаметов

R.R. Galiullin, Z.R. Yulmukhametov

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ОТЕЧЕСТВЕННОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ СИСТЕМ ТОЧНОГО ВОЖДЕНИЯ
МОБИЛЬНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ**

**DEVELOPMENT AND STUDY OF DOMESTIC HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX
FOR PRECISION CONTROL SYSTEMS OF MOBILE AGRICULTURAL UNITS**

Ключевые слова: высокоточное земледелие, автоматическое рулевое управление, машинно-тракторный агрегат, спутниковая навигация, GNSS приёмник, фильтр Калмана, коррекция координат, электромеханический исполнительный привод, импортзамещение.

Изложены результаты многолетних исследований по созданию, моделированию и всесторонним испытаниям конкурентоспособного отечественного аппаратно-программного комплекса (АПК) для систем автоматического управления курсом машинно-тракторных агрегатов (МТА). Комплекс спроектирован с ориентацией на применение доступной элементной базы и современных методов цифровой обработки навигационных сигналов. В ходе исследований разработана детализированная математическая модель динамики МТА, учитывающая его кинематические и силовые параметры, а также влияние пространственных наклонов на точность позиционирования. Для коррекции ошибок спутниковых измерений предложен и реализован адаптивный алгоритм на основе фильтра Калмана. Аппаратная платформа комплекса построена по модульному принципу и включает многочастотный спутниковый

приёмник, микроконтроллерный блок обработки данных, исполнительный электромеханический привод рулевого управления и планшетное устройство с графическим интерфейсом пользователя. Экспериментальные исследования включали стендовые тесты, компьютерное моделирование и масштабные производственные испытания на полях Республики Башкортостан на различных типах тракторов и самоходных шасси. Полученные результаты подтвердили высокую эксплуатационную эффективность разработки: точность вождения составила ± 10 см, что обеспечило снижение площадей технологических пропусков и перекрытий на 15-25%, экономию минеральных удобрений – до 20 на единицу площади и рост производительности агрегатов на 13-20%. Установлена возможность круглосуточной работы системы с повышением ночной выработки в 1,5-1,8 раза. Стоимостные показатели разработанного АПК минимум в 5 раз ниже характеристик импортных аналогов при обеспечении сопоставимого технологического эффекта. Практическая значимость работы заключается в предоставлении агропромышленному комплексу РФ полностью локализованного, адаптируемого и экономически доступного решения для автоматизации рутинных операций в поле, что

соответствует целям государственной программы развития сельского хозяйства.

Keywords: *high-precision agriculture, automatic steering, machine-tractor unit, satellite navigation, GNSS receiver, Kalman filter, coordinate correction, electromechanical actuator, import substitution.*

Improving crop production efficiency is directly related to the implementation of resource-saving technologies, among which parallel (high-precision) guidance systems occupy a key position. The existing market is saturated with expensive imported solutions which creates financial barriers for most agricultural producers and determines the strategic need for import substitution in this segment. This paper discusses the findings of long-term research on the development, modeling, and comprehensive testing of a competitive domestic hardware and software system (HSS) for automatic course control systems of machine-tractor units (MTU). The system was designed with an emphasis on the use of readily available components and modern methods of digital processing of navigation signals. During the research, a detailed mathematical model of MTU dynamics was developed taking into account its kinematic and force parameters as well as the effect of spatial tilt on

positioning accuracy. An adaptive algorithm based on the Kalman filter is proposed and implemented to correct satellite measurement errors. The complex's hardware platform is built on a modular principle and includes a multi-frequency satellite receiver, a microcontroller data processing unit, an electromechanical steering actuator, and a tablet device with a graphical user interface. The experimental studies included bench tests, computer simulation, and large-scale production trials in the fields of the Republic of Bashkortostan using various types of tractors and self-propelled chassis. The obtained results confirmed the high operational efficiency of the development: steering accuracy was ± 10 cm which resulted in a 15-25% reduction in the area of technological passes and overlaps, and savings of up to 20% on mineral fertilizers per unit area, and a 13-20% increase in unit productivity. The system is capable of 24-hour operation increasing nighttime output 1.5-1.8 times. The cost of the developed hardware and software system is at least five times lower than that of imported analogues while providing a comparable technological effect. The practical significance of this work lies in providing the Russian agro-industrial complex with a fully localized, adaptable, and affordable solution for automating routine field operations which aligns with the goals of the state agriculture development program.

Галиуллин Рустам Рифович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: rustam6274@mail.ru, eLibrary SPIN: 5661-1922, AuthorID: 294207.

Юлмухаметов Загир Ришатович, директор, ООО «ГАРАНТТЕХПРОЕКТ», г. Уфа, Российская Федерация, e-mail: ylmuck@gmail.com, eLibrary SPIN: 1933-4836, AuthorID: 1022245.

Galiullin Rustam Rifovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Bashkir State Agricultural University, Ufa, Russian Federation, e-mail: rustam6274@mail.ru, eLibrary SPIN: 5661-1922, AuthorID: 294207.

Yulmukhametov Zagir Rishatovich, Director, ООО «GARANTTEKHПРОЕКТ», Ufa, Russian Federation, e-mail: ylmuck@gmail.com, eLibrary SPIN: 1933-4836, AuthorID: 1022245.

Введение

Современный этап развития сельского хозяйства характеризуется активным переходом к технологиям точного земледелия, ключевым элементом которых являются системы автоматического вождения мобильных агрегатов. Данные системы позволяют исключить человеческий фактор при выполнении таких операций, как внесение удобрений, посев, междурядная обработка и уборка урожая, обеспечивая строгое соблюдение заданной технологической колее. Это приводит к значительной экономии материальных ресурсов (семян, удобрений, средств защиты растений), сокращению прямых энергетических затрат за счет исключения перекрытий, а также к существенному повышению производительности труда механизатора, который может концентрироваться на контроле со-

стояния рабочего оборудования, а не на удержании курса.

Мировой рынок подобных систем исторически сформирован продукцией ряда зарубежных компаний (Trimble, Raven, Topcon, TeeJet), предлагающих высокоточные, но крайне дорогостоящие комплексы [1]. Стоимость полного решения с подруливающим устройством для одного трактора может превышать 1,5 млн руб., что делает его малодоступным для средних и малых сельхозпредприятий России. Существующие отечественные разработки, как правило, имеют ограниченную функциональность, низкую точность или представляют собой просто программные курсоуказатели без интегрированной системы автоматического управления рулём.

В условиях реализации Федеральной научнотехнической программы развития сельского хозяйства и политики импортозамещения задача

создания полнофункционального, надёжного и при этом экономически доступного отечественного аппаратно-программного комплекса (АПК) для автоматического вождения приобретает высокую научно-техническую и народнохозяйственную значимость [2]. Такая система должна обеспечивать сантиметровую точность позиционирования, обладать отказоустойчивостью, простотой настройки и обслуживания в полевых условиях, а также иметь открытую архитектуру для интеграции с другими системами сельхозмашин.

Целью работы являлась комплексная разработка, математическое моделирование и экспериментальная апробация отечественного АПК для системы параллельного вождения, не уступающего по основным технико-экономическим показателям зарубежным аналогам.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- разработана математическая модель движения МТА, учитывающая его динамические характеристики и погрешности навигационных измерений;

- спроектирована и реализована аппаратная архитектура АПК на базе доступных компонентов, включая спутниковый приёмник, блок управления и исполнительный механизм;

- создано специализированное программное обеспечение с графическим интерфейсом для планшетных компьютеров и алгоритмы цифровой обработки сигналов для микроконтроллера;

- проведён цикл лабораторно-стендовых и полевых испытаний опытного образца для оценки его точности, надёжности и экономической эффективности.

Математическое

и алгоритмическое обеспечение комплекса

Точность работы любой системы параллельного вождения фундаментально зависит от точности определения текущих координат агрегата и качества алгоритмов прогнозирования его движения. В рамках исследования была разработана математическая модель, объединяющая модель динамики МТА, модель преобразования координат и модель фильтрации данных.

Для описания движения МТА в двумерной плоскости была использована кинематическая модель, дополненная силовыми факторами. Положение агрегата задаётся координатами его

условного центра масс (x, y) , углом ориентации относительно оси Север (α) и скоростью движения (s) . Управляющими воздействиями являются положение рычага подачи топлива (P) и угол поворота управляемых колёс (δ) .

Дифференциальные уравнения, описывающие динамику системы, могут быть представлены в следующем виде

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ s(t) \\ \alpha(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(t) \cos(\alpha(t)) \\ s(t) \sin(\alpha(t)) \\ N \frac{P(t)}{s(t)} - f_B B H (s(t))^2 - \sigma_1 f_{\text{ПР}} G \\ \frac{m + \sigma_2 m_{\text{П}}}{B} \frac{s(t) \tan(\alpha_1(t))}{B} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $x(t), y(t)$ – пройденный МА путь, м;

$s(t)$ – скорость движения, м/с;

$\alpha(t)$ – угол ориентации относительно оси x , град.;

N – мощность транспортного средства, Вт;

m и $m_{\text{П}}$ – массы трактора и подвесного орудия, кг;

B – колесная база трактора, м;

$P(t)$ – положение рычага управления подачи топлива (изменяется от -1 до 1);

H – высота трактора, м;

f_B – приведенный коэффициент сопротивления воздуха, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$;

$f_{\text{ПР}}$ – коэффициент сопротивления перекачиванию прицепного орудия;

G – вес прицепного орудия, Н ;

σ_1 и σ_2 – ступенчатые функции;

$\alpha_1(t)$ – угол поворота колеса, град.

Модель (1), реализованная в среде MATLAB/Simulink, легла в основу имитационного стенда для отработки алгоритмов управления.

Значительный источник погрешности позиционирования – смещение антенны спутникового приёмника, установленной на крыше трактора, при его продольном и поперечном крене. Для компенсации этого эффекта используются данные от встроенных в планшет или внешних датчиков наклона (акселерометр, гироскоп).

Скорректированные координаты с учётом углов крена (продольный и поперечный), а также высоты установки антенны и курса α рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} x_k &= x_{\text{gnss}} - H_a \cdot \sin(\Theta_x) \cdot \cos(90^\circ - \alpha); \\ y_k &= y_{\text{gnss}} - H_a \cdot \sin(\Theta_y) \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (2)$$

где x_{gnss}, y_{gnss} – «сырые» координаты, полученные от GNSS-приёмника после преобразования в плоскую проекцию.

Спутниковые измерения (2) подвержены шумам и кратковременным сбоям [3-5]. Для сглаживания траектории и повышения устойчивости работы системы применён дискретный фильтр Калмана [6]. В качестве вектора состояния X выбраны координаты и составляющие скорости:

$$x_k = [x, \dot{x}, y, \dot{y}]^T.$$

Уравнения предсказания и обновления фильтра имеют стандартный вид:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k|k-1} &= F_k \hat{X}_{k-1|k-1}; \\ P_{k|k-1} &= F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k; \\ K_k &= P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}; \\ \hat{X}_{k|k} &= \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k-1}); \\ P_{k|k} &= (1 - K_k H_k) P_{k|k-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где F_k – матрица перехода состояния;

P – ковариационная матрица ошибки;

Q_k – ковариация шума процесса;

H_k – матрица измерений;

R_k – ковариация шума измерений (зависит от показателя качества сигнала GNSS);

K_k – коэффициент усиления Калмана;

Z_k – вектор измерений.

Особенностью реализации (3) является адаптивная настройка матрицы R_k в зависимости от скорости движения агрегата и числа принимаемых спутников, что позволило улучшить качество фильтрации на поворотах и при работе в сложных условиях (лесополосы, ЛЭП).

АПК построен по распределённой модульной архитектуре (рис. 1), что повышает его надёжность и упрощает модернизацию. В состав комплекса входят навигационно-вычислительный модуль, модуль управления и сопряжения и исполнительный модуль.

Навигационно-вычислительный модуль построен на базе промышленного планшетного компьютера с операционной системой Android, который выполняет функции центра управления. На планшете функционирует специализированное приложение. Оно обеспечивает приём и первичную обработку данных, поступающих по беспроводному интерфейсу Bluetooth от GNSS-приёмника, вычисляет отклонение движения агрегата от заданной технологической линии, формирует управляющие команды, а также отображает карту-план поля, текущее положение и траекторию движения агрегата с использованием трёхмерной визуализации.

GNSS-модуль основан на OEM-плате много-частотного приёмника NovAtel OEMStar-10Hz-G. Данная плата поддерживает одновременный приём и обработку сигналов спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС в частотных диапазонах L1 [7]. Ключевыми характеристиками модуля являются частота обновления координат до 10 Гц и наличие встроенной технологии GLIDE, предназначенной для сглаживания фазовых измерений. Использование этой технологии является критически важным для достижения сантиметровой точности позиционирования в условиях кинематического режима движения. Приёмный тракт завершается внешней активной антенной, которая устанавливается на крыше кабины транспортного средства для обеспечения оптимальных условий приёма.

Модуль управления и сопряжения реализован на основе 32-разрядного микроконтроллера семейства STM32F3, оснащённого высокопроизводительным ядром ARM Cortex-M4. Основная функция данного модуля заключается в получении по беспроводному каналу Wi-Fi целевого задания на угол поворота управляемых колёс от навигационно-вычислительного модуля. После этого модуль опрашивает подключённый датчик угла поворота рулевой колонки для определения текущего положения и формирует соответствующие широтно-импульсные модулированные (ШИМ) сигналы для управления силовой частью электропривода. Для гарантии детерминированного и безотказного выполнения критически важных функций, таких как обработка данных с датчиков и реализация алгоритма PID-регулирования, в модуле используется операционная система реального времени FreeRTOS.

Исполнительный модуль, представляющий собой электромеханический привод рулевого управления, в качестве силового элемента использует высокомоментный реверсивный электродвигатель постоянного тока модели GNM 2145C-G1. Двигатель снабжён планетарным редуктором и через специальную разъёмную муфту напрямую соединяется с рулевым валом трактора. Управление двигателем осуществляется с помощью мостового H-драйвера, построенного на базе специализированной микросхемы PLDC 2080. Этот драйвер обеспечивает точное регулирование скорости и направления вращения двигателя в соответствии с управляющими сигналами от модуля управления. Кон-

струкция привода рассчитана на создание достаточного крутящего момента для поворота колёс трактора в статическом режиме, в том

числе при отключённом штатном гидроусилителе руля.

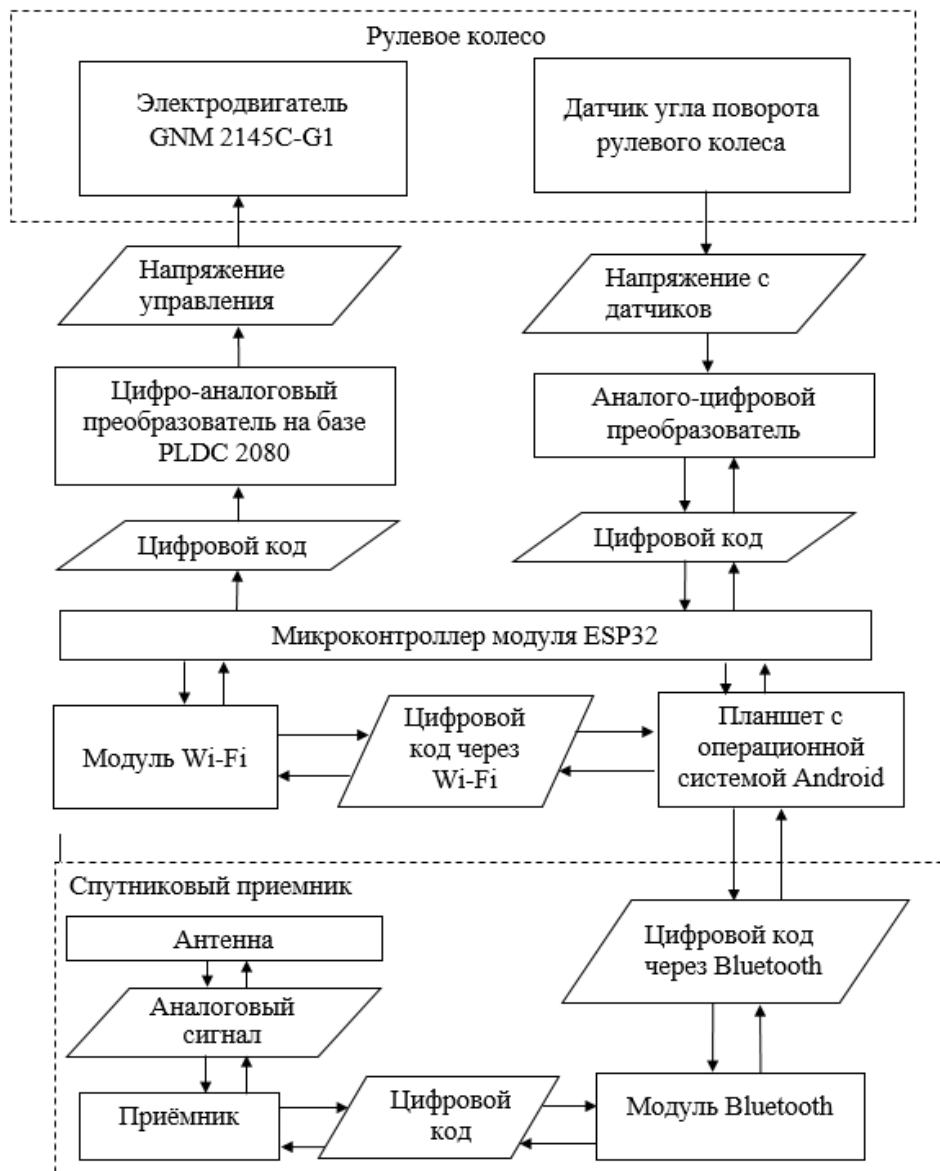


Рис. 1. Структурно-функциональная схема аппаратно-программного комплекса для системы параллельного вождения МТА

Программное обеспечение и пользовательский интерфейс

Программная часть системы разделена на два крупных блока: приложение для планшета и прошивка для микроконтроллера.

Мобильное приложение разработано в среде Android Studio с использованием Java и OpenGL ES для графики (рис. 2). Графический интерфейс приложения спроектирован с упором на интуитивную понятность для оператора. Его структура включает несколько логических блоков. Центральную часть экрана занимает карто-

графическое отображение местности. Для оперативного контроля параметров на экране постоянно присутствует информационная панель. Она содержит актуальные данные о текущих координатах агрегата, его скорости и направлении движения, пройденном пути и общей обработанной площади. Управление работой системы сосредоточено в отдельном окне настройки автопилота. Здесь оператор вводит технологическую ширину захвата орудия, выбирает алгоритм движения (например, по прямым параллельным линиям или следование контуру поля),

а также задаёт базовую линию для ориентации, отмечая на карте две точки – А и В.

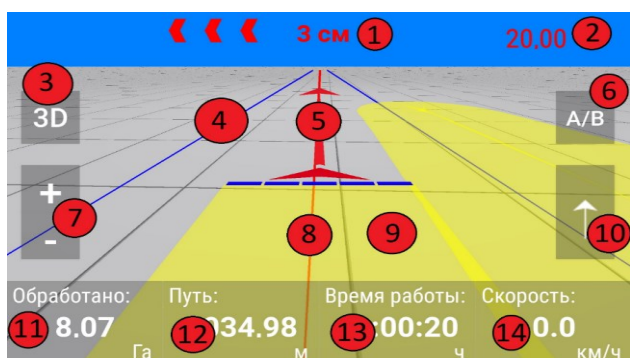


Рис. 2. Скриншот интерфейса главного экрана с картой и треком мобильного приложения:

- 1 – курсоуказатель; 2 – ширина орудия;
- 3 – переключение режима отображения 2D/3D;
- 4 – соседние направляющие; 5 – направление движения;
- 6 – указание точек для построения линии А/В; 7 – управление масштабом;
- 8 – текущая направляющая; 9 – трек;
- 10 – запись трека; 11 – обработанная площадь (га); 12 – путь; 13 – время работы/текущее время и дата; 14 – скорость агрегата (км/ч)

Экспериментальные исследования и результаты испытаний

Испытания проводились в три этапа: лабораторно-стендовые, полевые тесты на точность и производственные сравнительные испытания.

На первом этапе была собрана стендовая установка), позволившая отладить взаимодействие всех модулей, проверить корректность работы ПИД-регулятора и калибровать датчики (рис. 3. С помощью имитатора GNSS-сигналов проверялась реакция системы на резкие изменения заданного курса.

Полевые испытания проводились на тракторах МТЗ-82 и John Deere 6930 [8]. Для объективной оценки точности позади трактора цеплялось прицепное устройство, оставляющее чёткий след на рыхлой почве. После прохождения тестового участка производились замеры отклонений реального следа от прямой линии, построенной системой. Результаты более 50 заездов показали, что среднее квадратическое отклонение от линии не превышает 8-10 см, максимальные единичные отклонения – до 20 см, что соответствует требованиям для операций внесения твёрдых удобрений и посева.



Рис. 3. Общий вид стендового варианта АПК

Наиболее показательные испытания выполнены на самоходном разбрасывателе минеральных удобрений «Туман-2», штатно оборудованном системой TeeJet Matrix Pro 570GS (США). На данную машину параллельно был установлен разработанный АПК. В ходе работы по внесению удобрений на полях Республики Башкортостан одновременно регистрировались треки и технологические параметры от обеих систем.

Результаты обработки данных показали практически полную идентичность показателей:

обработанная площадь, длина пути, время чистой работы. При этом в двух случаях при движении под высоковольтной линией электропередачи штатная система TeeJet подверглась перезагрузке, потребовавшей остановки агрегата, тогда как отечественный АПК продолжил работу без видимых сбоев, временно перейдя на инерциальное счисление по данным акселерометра/гироскопа.

На основе данных, полученных в ходе полевых испытаний на различных культурах и технологических операциях, был рассчитан совокуп-

ный технологический и экономический эффект от внедрения системы. Использование комплекса позволяет сократить площади непроизводительных перекрытий и пропусков на 15-25%, что напрямую ведёт к экономии семенного материала и минеральных удобрений, экономия последних может достигать 20% за счет исключения дублирования внесения на перекрывающихся участках. Производительность выполнения работ возрастает на 13-20%, что обусловлено возможностью поддержания стабильно высокой рабочей скорости, исключением затрат времени на манёвры при заезде в смежную полосу и высвобождением внимания механизатора от задачи удержания рядности для контроля состояния агрегата. Существенным преимуществом является возможность эффективной организации работ в ночное время, где производительность по сравнению с ручным управлением возрастает в 1,5-1,8 раза, поскольку нивелируются факторы усталости оператора и ограниченной видимости. Совокупное действие перечисленных факторов ведёт к значительному сокращению оптимальных агротехнических сроков выполнения критически важных операций, таких как посев и уборка, на 15-25%. Это позволяет существенно снизить производственные риски, связанные с воздействием неблагоприятных погодных условий.

Выводы

Проведённые исследования и испытания доказали высокую эффективность и практическую пригодность разработанного отечественного аппаратно-программного комплекса для систем автоматического параллельного вождения. Ключевым результатом работы является создание конкурентоспособного технологического решения, обеспечивающего точность позиционирования на уровне ± 10 см, что полностью удовлетворяет требованиям современных агротехнологий, таких как посев, внесение удобрений и междурядная обработка. Важнейшим достоинством комплекса стала его отказоустойчивость, достигнутая за счет модульной архитектуры и применения алгоритмов инерциального резервирования, гарантирующих непрерывность работы даже в условиях кратковременной потери спутникового сигнала. Существенным конкурентным преимуществом является экономическая доступность решения: стоимость комплекса в 5-7 раз ниже рыночной цены импортных аналогов, что создаёт предпосылки для его широко-

го распространения в сельхозпредприятиях различного масштаба.

Заключение

Проведённые производственные испытания показали, что разработанный АПК по основным технологическим показателям (точность вождения, надёжность) не уступает лидирующим зарубежным аналогам, а по критерию «стоимость-эффективность» существенно их превосходит. Внедрение комплекса позволяет добиться значительной экономии материальных ресурсов (удобрений, семян, топлива), повысить производительность полевых работ на 13-20% и обеспечить возможность их выполнения в круглосуточном режиме.

Библиографический список

1. Внедрение системы точного земледелия / К. П. Андреев, Н. В. Аникин, Н. В. Бышов [и др.]. – Текст: электронный // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2019. – № 2 (42). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-sistemy-tochnogo-zemledeliya> (дата обращения: 23.03.2026).
2. Роль дистанционного зондирования земли в точном земледелии / В. П. Якушев, В. В. Якушев, С. Ю. Блохина. – DOI 10.31857/S0869587323100110. – Текст: непосредственный // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 10. – С. 955-969.
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под редакцией А. И. Петрова, В. И. Харисова. – Изд-е 3-е, перераб. – Москва: Радиотехника, 2005. – 688 с. – Текст: непосредственный.
4. Лахтина, Н. Ю. Техническое обеспечение телематических систем. Системы определения местоположения и идентификации транспортных средств: методическое пособие / Н. Ю. Лахтина, К. Г. Манушакян. – Москва: МАДИ, 2017. – 68 с. – Текст: непосредственный.
5. Тяпкин, В. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография / В. Н. Тяпкин, Е. Н. Гарин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 260 с. – Текст: непосредственный.
6. Воевода, А. А. Моделирование фильтра Калмана с обновлённой последовательностью в среде Simulink / А. А. Воевода, Г. В. Трошина. –

DOI 10.17212/2307-6879-2015-2-7-17. – Текст: непосредственный // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 2 (80). – С. 7-17.

7. NovAtel OEMStar [internet]. – URL: <http://www.gnssplus.ru/gnss-receivers/boards/38-novatel-oemstar.html> (дата обращения: 23.05.2024). – Текст: электронный.

8. Guo, J., Li, X., Li, Z. *et al.* (2018). Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 19, 895–911. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8>.

References

1. Andreev K. P. Vnedrenie sistemy tochnogo zemledeliya / K. P. Andreev, N. V. Anikin, N. V. Byshov [i dr.] // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2019. – No. 2 (42). – S. 74-80.

2. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Blokhina S.Yu., Blokhin Yu.I., Matveenko D.A. Rol distantsionnogo zondirovaniya zemli v tochnom zemledelii // Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. – 2023. – T. 93. – No. 10. – С. 955-969. DOI: 10.31857/S0869587323100110.

3. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya / pod red. A. I. Petrova, V. I. Kharisova. –

lzd-e 3-e, pererab. – Moskva: Radiotekhnika, 2005. – 688 s.

4. Lakhtina, N.Yu. Tekhnicheskoe obespechenie telematicheskikh sistem. Sistemy opredeleniya mestopolozheniya i identifikatsii transportnykh sredstv: metodicheskoe posobie / N.Yu. Lakhtina, K.G. Manushakyan. – Moskva: MADI, 2017. – 68 s.

5. Tyapkin, V. N. Metody opredeleniya navigatsionnykh parametrov podvizhnykh sredstv s ispolzovaniem sputnikovoy radionavigatsionnoy sistemy GLONASS: monografiya / V. N. Tyapkin, E. N. Garin. – Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2012. – 260 s.

6. Voevoda A.A., Troshina G.V. Modelirovanie filtra Kalmana s obnovlennoy posledovatelnostyu v srede Simulink // Sbornik nauchnykh trudov NGTU. 2015. No. 2 (80). S. 7–17. DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-7-17.

7. NovAtel OEMStar [internet]. Rezhim dostupa: <http://www.gnssplus.ru/gnss-receivers/boards/38-novatel-oemstar.html> (data obrashcheniya: 23.05.2024).

8. Guo, J., Li, X., Li, Z. *et al.* (2018). Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 19, 895–911. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8>.



УДК 621.316.7

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-258-4-89-97

А.С. Угловский

A.S. Uglovskiy

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ПРОГНОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПИТАНИЕМ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКЕ

ARCHITECTURE OF A PREDICTIVE POWER MANAGEMENT SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT UNDER STOCHASTIC PULSE LOAD

Ключевые слова: автономный мобильный робот, электроимпульсная прополка, система управления энергопитанием, стохастическая импульсная нагрузка, прогнозное управление, адаптивное демпфирование, энергетическая устойчивость, шина постоянного тока.

Рассматривается проблема обеспечения энергетической устойчивости автономных мобильных роботов, оснащённых электроимпульсными рабочими органами, функционирующих в условиях стохастически распределённой импульсной нагрузки. Предложена оригинальная архитектура системы перерас-

пределения энергии, основанная на концепции единой шины постоянного тока с упреждающим цифровым управлением тяговыми электроприводами. Разработан математический аппарат, включающий стохастическую модель импульсной нагрузки, критерий энергетической живучести системы и закон адаптивного демпфирования тяговой мощности. Выявлено, что стохастическая генерация высоковольтных разрядов (мощностью до 5 кВт) при ограниченной ёмкости источника питания приводит к возникновению режима нагрузки постоянной мощности, которая вызывает критические просадки напряжения в звене постоянного тока, ускоренную деградацию литий-