

EDN: XYJQJR

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-4-12



Научная статья

УДК 621.3



Электронная система управления последовательного гибридного трактора с мотор-колесами

Андрей Юрьевич Измайлов¹,
доктор технических наук, профессор,
академик Российской академии наук,
член Президиума РАН, директор,
e-mail: vim@vim.ru;

Алексей Валерьевич Букреев¹,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: vim@aleksey-bukreev.ru;

Рудольф Юрьевич Соловьев¹,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: rudsol@mail.ru;

Роман Рудольфович Соловьев¹,
младший научный сотрудник,
e-mail: soll.rom@yandex.ru;

Иван Дмитриевич Даненков²,
аспирант, инженер,
e-mail: vano755557@gmail.com

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

²Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП НАМИ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Сельское хозяйство все меньше зависит от традиционных механических систем по мере внедрения интеллектуальных систем управления. Использование адаптивных алгоритмов и нейронных сетей позволяет оптимизировать работу двигателей, аккумуляторов и гидравлических систем при переменной нагрузке и сложных условиях эксплуатации. (*Цель исследования*) Разработать электронную систему управления (ЭСУ) для последовательного гибридного трактора с мотор-колесами. (*Материалы и методы*) Исследования включали анализ компонентов гибридного трактора, таких как дизель-генератор, тяговая батарея, мотор-колеса и электронные блоки управления (ЭБУ). В основе архитектуры лежит использование микропроцессорных модулей с системами обратной связи (в основном CAN-шина для обмена данными), а также разрабатываются модели алгоритмов управления для обеспечения точной и адаптивной работы систем с учетом динамических условий эксплуатации. (*Результаты и обсуждение*) Предлагаемая электронная система управления позволяет повысить энергетическую эффективность и экологическую безопасность последовательного гибридного трактора с мотор-колесами. Внедрение адаптивных алгоритмов позволяет увеличить коэффициент полезного действия дизельного двигателя-генератора до 42 процентов, снизить расход топлива на 12-15 процентов и уменьшить выбросы CO₂ на 15 процентов. Точные системы гидравлики и торможения обеспечивают снижение тормозного пути на 8-12 процентов, а нейронные сети позволяют прогнозировать параметры торможения с точностью до 95 процентов. Модернизированные аккумуляторные системы демонстрируют стабильную работу при температурах от 0 до 100 градусов Цельсия, что способствует долговечности и надежности оборудования. Эти результаты подтверждают перспективность применения интеллектуальных систем для повышения эффективности и экологической безопасности сельскохозяйственной техники. (*Выводы*) Разработанная электронная система управления позволяет оптимизировать работу компонентов сельскохозяйственной техники последовательного гибридного трактора с мотор-колесами. Адаптивное и точное регулирование параметров в реальном времени улучшает маневренность и безопасность работы трактора в различных условиях эксплуатации, что способствует продлению срока службы компонентов и повышению производительности.

Ключевые слова: гибридный трактор, электронная система управления, мотор-колеса, энергоэффективность, алгоритмы управления, экологические технологии.

■ **Для цитирования:** Измайлов А.Ю., Букреев А.В., Соловьев Р.Ю., Соловьев Р.Р., Даненков И.Д. Электронная система управления последовательного гибридного трактора с мотор-колесами // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №4, С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-4-12. EDN: XYJQJR.

Scientific article

Electronic Control System for a Series Hybrid Tractor with In-Wheel Motors

Andrey Yu. Izmaylov¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy
of Sciences, member of the Presidium of the Russian
Academy of Sciences, director,
e-mail: vim@vim.ru;

Alexey V. Bukreev¹,
Ph.D.(Eng.), senior researcher, head of laboratory,
e-mail: vim@aleksey-bukreev.ru;

Rudolf Yu. Solovyov¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
leading researcher,
e-mail: rudsol@mail.ru;

Roman R. Solovyov¹,
junior researcher,
e-mail: soll.rom@yandex.ru;

Ivan D. Danenkov²,
Ph.D. student (Eng.), engineer,
e-mail: vano755557@gmail.com

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

²State Scientific Center of the Russian Federation FSUE NAMI, Moscow, Russian Federation

Abstract. Modern agriculture is becoming less dependent on traditional mechanical systems with the introduction of intelligent control systems. These systems utilize adaptive algorithms and neural networks to optimize the operation of engines, batteries, and hydraulic systems under variable loads and complex operating conditions. (*Research purpose*) To develop an electronic control system for a series hybrid tractor equipped with in-wheel motors. (*Materials and methods*) The study involved an analysis of the hybrid tractor components, including the diesel generator, traction battery, in-wheel motors, and electronic control units. The system architecture is based on microprocessor modules with feedback mechanisms (primarily using the CAN bus for data exchange). Control algorithm models were developed to ensure precise and adaptive system performance under dynamic operating conditions. (*Results and discussion*) The implementation of adaptive algorithms increases the efficiency of the diesel engine-generator by 42%, reduces fuel consumption by 12-15%, and decreases CO₂ emissions by 15%. The precision hydraulic and braking systems shorten the braking distance by 8–12%, while neural networks enable prediction of braking parameters with up to 95% accuracy. In addition, the upgraded battery systems maintain stable operation across a wide temperature range from 0 to 100°C, contributing to the durability and reliability of the equipment. These results confirm the potential of intelligent control systems to enhance both the efficiency and environmental sustainability of agricultural machinery. (*Conclusions*) The developed electronic control system optimizes the performance of the components in a series hybrid tractor with in-wheel motors, enabling adaptive and precise real-time regulation of operational parameters. It improves enhances the tractor's maneuverability and operational safety under varying field conditions. Ultimately, it leads to a longer component lifespan and improved overall productivity.

Keywords: hybrid tractor, electronic control system, in-wheel motors, energy efficiency, control algorithms, environmental technologies.

■ For citation: Izmaylov A.Yu., Bukreev A.V., Solovyov R.Yu., Solovyov R.R., Danenkov I.D. Electronic control system for a series hybrid tractor with in-wheel motors. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-4-12. EDN: XYJQJR.

Современное сельское хозяйство сталкивается с двойным вызовом: необходимостью повышения производительности техники и одновременным снижением экологического следа. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), на сельхозтехнику приходится до 15% глобальных выбросов CO₂, при этом традиционные тракторы с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) демонстрируют КПД не более 35-40% из-за неоптимальных режимов работы двигателя и потерь в механической трансмиссии [1]. Эти факторы стимулируют разработку альтернативных силовых установок, среди которых последовательные гибридные системы с мотор-колесами занимают особое место [2, 3]. Их ключевое преимущество – разделение функций генерации энергии (ДВС) и ее преобразование в движение (электропривод) позволяет работать двигателю в зоне максимального КПД, а также реализовать прецизионное управление тягой [4]. Установили, что наиболее эффективным является электриче-

ский бесщеточный двигатель постоянного тока, удельная стоимость энергии которого (15-27 руб/кВт·ч) в 1,5-1,8 раза ниже, чем у дизельного двигателя, при максимальном КПД 95% [5]. Оптимальным источником питания для такого электропривода служат литий-ионные аккумуляторы, характеризующиеся высокой удельной энергоемкостью (432-864 кДж/кг) и низкой стоимостью единицы энергии (5-45 руб/кДж).

Последовательная гибридная схема подразумевает, что ДВС не связан напрямую с колесами, а работает только для выработки электроэнергии через генератор, который заряжает тяговую батарею или напрямую питает мотор-колеса. Такая система требует глубокой междисциплинарной разработки, включая электротехнику, алгоритмы управления и энергетику. Ее внедрение позволяет создать трактор нового поколения с повышенной эффективностью и минимальным воздействием на окружающую среду [6, 7].

Несмотря на прогресс, внедрение таких систем сдерживается рядом проблем.

Во-первых, алгоритмы управления часто не учитывают динамическую природу сельскохозяйственных операций. Например, при переходе от транспортировки грузов (постоянная нагрузка) к вспашке (циклическая нагрузка) ДВС-генератор может работать в неоптимальных режимах, увеличивая расход топлива на 12-15% [8]. Регулирование частоты вращения вала двигателя в зависимости от нагрузки позволяет снизить удельный расход топлива на 30% и более, повышая энергоэффективность агрегатов [9]. Во-вторых, большинство электронных систем управления используют статические карты управления, не способные адаптироваться к изменениям грунта, его влажности или уклонам [10]. В-третьих, несовместимость протоколов связи между компонентами от разных производителей увеличивает стоимость разработки.

Цель исследования: предложить новую архитектуру электронной системы управления (ЭСУ) последовательного гибридного трактора с мотор-колесами.

Материалы и методы. Основные компоненты последовательного гибридного трактора с мотор-колесами (*таблица*) включают ДВС-генератор, тяговую батарею, мотор-колеса, инверторы и электронные блоки управления (ЭБУ). Каждый элемент играет критическую роль в оптимизации энергопотребления и адаптации к условиям эксплуатации.

ЭСУ представляет собой совокупность многофункциональных вычислительных модулей, обеспечивающих координацию отдельных компонентов последовательной гибридной системы трактора. В основе ЭСУ лежит принцип обратной связи: система постоянно отслеживает различные параметры работы трактора со всех ЭБУ и на основе заданных алгоритмов выдает управляющие сигналы, чтобы поддерживать работу систем в оптимальном режиме.

Для обмена данными между всеми модулями используется цифровая коммуникационная шина (CAN-шина) [11]. CAN-шина – это стандарт промышленной сети, разработанный специально для автомобильной промышленности. Она позволяет обме-

ниваться данными по двум проводам, обеспечивая надежную и быструю передачу информации.

Результаты и обсуждение. Разработана структурная схема ЭСУ последовательного гибридного трактора с мотор-колесами (*рис. 1*).

ЭБУ двигателем внутреннего сгорания регулирует работу ДВС в соответствии с нагрузкой на генератор и уровнем заряда батареи. Принцип работы основан на поддержании оборотов в диапазоне, соответствующем зоне максимального КПД. Его алгоритмы управления базируются на нелинейной модели предиктивного контроля, которая минимизирует целевую функцию, включающую расход топлива и уровень выбросов.

Двигатель внутреннего сгорания функционирует в режиме изохронного регулирования, частота вращения вала поддерживается в диапазоне 1500-2000 об/мин, что соответствует максимальному эффективному КПД (до 42%). Динамическая калибровка впрыска топлива осуществляется на основе данных датчиков давления в цилиндрах и лямбда-зондов. Использование методики определения многопараметровой характеристики удельного расхода топлива двигателя [12] на основе данных CAN-шины, получаемых в режиме реального времени, позволяет оптимизировать эксплуатационные режимы ДВС.

Каждое мотор-колесо оснащено трехфазным синхронно-реактивным двигателем, управляемым инвертором с ШИМ-модуляцией на базе IGBT-модулей. ЭБУ инвертором реализует векторное управление моментом (*FOC*) через преобразование Кларка-Парка, с обратной связью по положению угла ротора θ (энкодеры или резольверы). Основные принципы векторного управления моментом заключаются в преобразовании координат. Для начала выполняется измерение токов статора (I_a, I_b, I_c) (возможно измерение только токов двух фаз I_a и I_c).

Затем выполняется преобразование Кларка ($\alpha-\beta$) по выражениям (1) и (2), переход от трехфазной системы статора (I_a, I_b, I_c) к двухфазной неподвижной системе координат (I_α, I_β) (*рис. 2*).

Таблица		Table
Основные компоненты последовательного гибридного трактора с мотор-колесами MAIN COMPONENTS OF A SERIES HYBRID TRACTOR WITH IN-WHEEL MOTORS		
Компонент	Характеристика	
ДВС-генератор	Дизельный двигатель с генератором для зарядки батареи	
Тяговая батарея	Аккумулятор с системой терморегуляции	
Мотор-колеса	Четыре синхронно-реактивных электродвигателя с независимым управлением	
Инверторы	DC-AC преобразователи для синхронно-реактивных электродвигателей	
Электронные блоки управления (ЭБУ)	В зависимости от комплектации могут быть электронные блоки управления тормозной системой (ABS/ESP), подвеской, рулевым управлением, кузовной электроникой (BCM), приборной панелью, мультимедиа, навигацией и т.д. Каждый блок имеет схожую архитектуру с микропроцессором, памятью, входами/выходами и коммуникационными интерфейсами, но специализируется на управлении определенной системой	

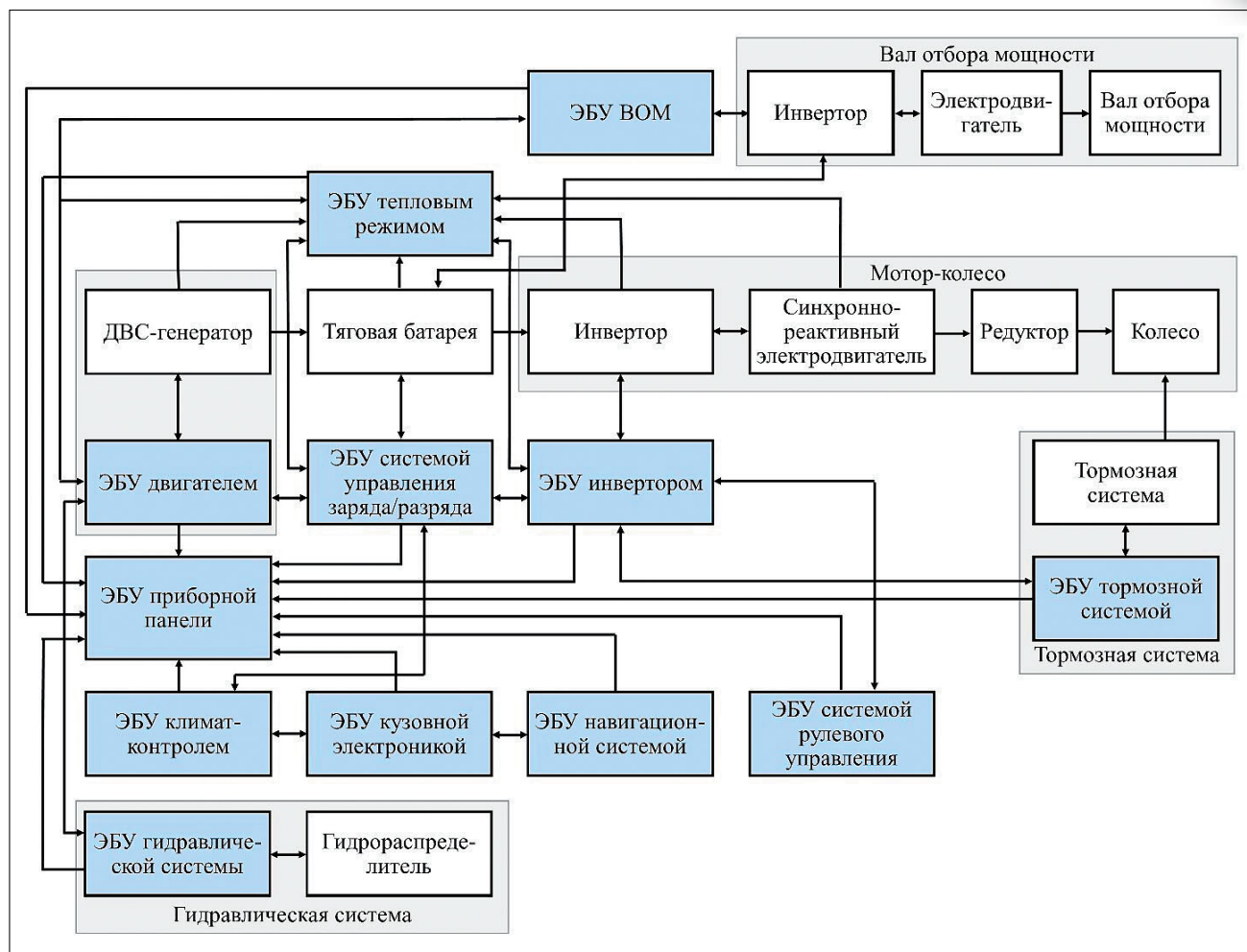


Рис. 1. Структурная схема электронной системы управления (ЭСУ) последовательного гибридного трактора с мотор-колесами

Fig. 1. Block diagram of the Electronic Control System (ECS) of a series hybrid tractor with in-wheel motors

$$I_{\alpha} = I_a,$$

$$I_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_a + 2I_b).$$

- (1) После этого выполняется преобразование Парка ($d-q$), т.е. переход от системы $\alpha-\beta$ к вращающейся системе координат, связанной с ротором (I_d, I_q) (рис. 3).
- (2)

$$I_d = I_{\alpha} \cos \theta + I_{\beta} \sin \theta, \quad (3)$$

$$I_q = -I_{\alpha} \sin \theta + I_{\beta} \cos \theta, \quad (4)$$

где θ – угол положения ротора; I_d – ток намагничивания управляет магнитным потоком; I_q – моментный ток управляет моментом двигателя.

Регуляторы тока для I_d и I_q сравнивают заданные и измеренные значения, формируя управляющие напряжения V_d и V_q .

После происходит обратное преобразование Парка и Кларка, преобразование V_d и V_q обратно в трехфазные напряжения (V_a, V_b, V_c) для ШИМ-модуляции инвертора. Инвертор формирует управляющие импульсы для двигателя.

В условиях неравномерного сцепления (например, на влажном грунте) система перераспределя-

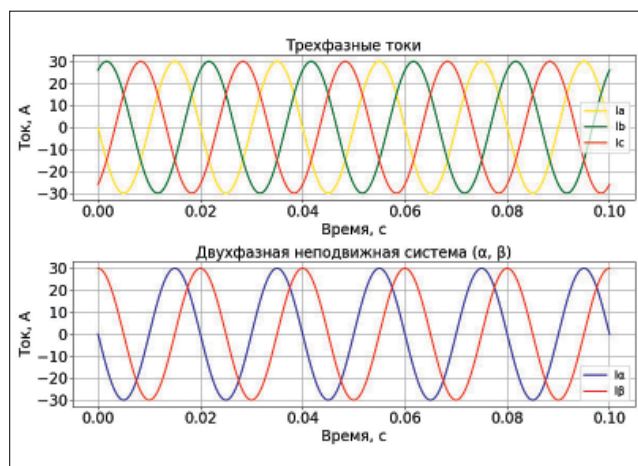


Рис. 2. Переход от трехфазной системы к двухфазной неподвижной системе координат

Fig. 2. Transition from a three-phase system to a two-phase stationary coordinate system

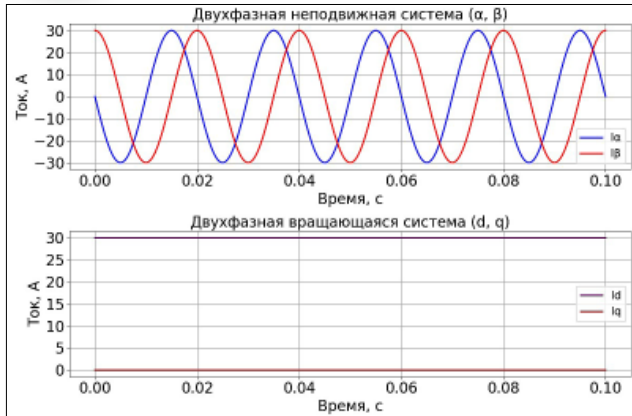


Рис. 3. Переход от двухфазной неподвижной системы координат к двухфазной вращающейся системе координат
Fig. 3. Transition from a two-phase stationary coordinate system to a two-phase rotating coordinate system

ет крутящий момент между колесами, снижая энергопотери на 15-20%. Временная задержка системы управления не превышает 50 мс, что обеспечивает выполнение условия Найквиста (критерия Найквиста) для частот до 10 Гц.

ЭБУ системой управления заряда/разряда тяговой батареи контролирует ячейки тяговой батареи. Для предотвращения деградации используется активная балансировка с точностью ± 5 мВ. Тепловая модель, интегрированная в ЭБУ, регулирует температуру в диапазоне 15-35 °C посредством жидкостного охлаждения. При пиковых нагрузках (подъеме на уклон 20%, вспашке и т.д.) система ограничивает разрядный ток, что увеличивает ресурс батареи на 30% по сравнению с пассивным управлением. При пиковых нагрузках ЭБУ ограничивает глубину разряда до 70%, увеличивая срок службы батареи. Предиктивный алгоритм на основе модели Тевенина [13] оценивает остаточную емкость с учетом циклов заряда/разряда и температуры.

Модель Тевенина записывается выражением:

$$U_{ак}(t) = \frac{1}{\tau} (I_{ак}(t)R_s + E_0 - U_{ак}(t)), \quad (5)$$

где $U_{ак}(t)$ – напряжение батареи; $I_{ак}(t)$ – ток батареи; R_s – полное внутреннее сопротивление; E_0 – ЭДС батареи; τ – постоянная времени.

Параметры модели Тевенина для всей разрядной характеристики батареи определяются с помощью интерполяции.

В качестве узлов интерполяции выбираются фиксированные значения параметров в точках разрядной кривой, соответствующих заданным уровням степени заряженности SOC:

$$SOC_j = SOC_{j-1} + k (U_{акj-1} - \hat{U}_{акj-1}), \quad (6)$$

где $U_{акj-1}$ – измеренное напряжение батареи; $\hat{U}_{акj-1}$ – оценка напряжения на основе модели; k – коэффициент пропорциональности.

$$k = \frac{1}{U_{max}}, \quad (7)$$

где U_{max} – напряжение полностью заряженной батареи.

В модели (5) параметры E_0 , τ и полная емкость Q_0 связаны с температурой T линейной зависимостью. Однако полное сопротивление $R_s(t)$ зависит от температуры нелинейно:

$$R_s(T) = R_s(T_{ref}) \cdot \exp \left(K_R \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right), \quad (8)$$

где T_{ref} – эталонная температура батареи; K_R – коэффициент, определяемый экспериментально.

K_R вычисляется по выражению:

$$K_R = - \frac{\ln \left(\frac{R_s(T_{min})}{R_s(T_{ref})} \right)}{\frac{1}{T_{min}} - \frac{1}{T_{ref}}}, \quad (9)$$

где T_{min} – минимально допустимая температура батареи.

В памяти ЭБУ системой управления заряда/разряда тяговой батареи хранятся параметры модели, определенные при нормальной (T_{ref}) и минимальной (T_{min}) величине температуры тяговой батареи.

Для расчета параметров модели при текущей температуре выполняются следующие действия:

- расчет линейных зависимостей для параметров E_0 , τ и Q_0 ;
- определение коэффициента K_R ;
- на основе полученных коэффициентов вычисляются $E_0(T)$, $\tau(T)$, $R_s(T)$, $Q_0(T)$. Эти параметры используются в алгоритме оценки остаточной емкости батареи.

ЭБУ тепловым режимом играет критическую роль в обеспечении стабильности и долговечности компонентов гибридной системы. Данный блок координирует работу систем охлаждения и подогрева, поддерживая температурные параметры в оптимальных диапазонах для батареи, электродвигателей, инверторов и вспомогательных устройств. В исследовании [14] изучено влияние низких температур на параметры гелевых тяговых аккумуляторов электротранспорта. Результаты показали снижение времени работы на 33% по сравнению с режимом при 22-24 °C, что подтверждает необходимость учета температурного фактора при эксплуатации спецтехники.

Система управления тепловым режимом повышает надежность гибридной установки на 25%. При температуре тяговой батареи ниже 0 °C активируется предпусковой подогрев до достижения 15 °C, что снижает деградацию батареи на 20% [15]. В режиме заряда/разряда жидкостное охлаждение поддерживает температуру ячеек в диапазоне 25-35 °C (ΔT между ячейками ≤ 3 °C). При превышении температуры обмоток мотор-колес более 80 °C или ин-

верторов более 60 °С включается жидкостное охлаждение (этиленгликолевый теплоноситель циркулирует через алюминиевые радиаторы). В аварийных режимах ($T > 100$ °С) мощность мотор-колес ограничивается на 50%.

ЭБУ тормозной системы представляет собой высокотехнологичный вычислительный модуль, обеспечивающий точное и адаптивное управление процессами торможения. Его основная функция заключается в интеграции данных от сенсорных систем, анализе текущих динамических параметров движения и генерации управляющих сигналов для исполнительных механизмов, что позволяет реализовать комплексные алгоритмы повышения безопасности и эффективности торможения.

Ключевыми компонентами системы являются датчики скорости вращения колес на основе эффекта Холла с разрешением до 0,1°, инерциальные измерительные модули, включающие трехосевые акселерометры и гироскопы с точностью $\pm 0,5\%$, а также датчики давления в гидравлических магистралях с диапазоном измерений 0-300 бар и погрешностью менее 1%. Применение автоматизированной системы с алгоритмом *ANN-PID*-контроллера [16] позволяет автоматизировать управление тормозной педалью тракторов за счет анализа ключевых эксплуатационных параметров: типа рабочей поверхности, расстояния до препятствий и скорости передвижения (10-25 км/ч). Использование многослойной нейронной сети (*MLPNN 3-6-2*) обеспечит высокоточное прогнозирование положения тормозной педали и параметров замедления. Оптимизированные методом Циглера–Николса коэффициенты *PID*-регулятора позволят достичь эффективного торможения в различных условиях эксплуатации. При этом следует учитывать, что с ростом скорости от 10 до 25 км/ч будет наблюдаться пропорциональное увеличение тормозного пути и коэффициента проскальзывания независимо от типа поверхности (уплотненный грунт, вспаханное поле, асфальтовое покрытие). Полученные результаты открывают перспективы для внедрения интеллектуальных систем торможения в конструкции малогабаритной сельскохозяйственной техники нового поколения.

Как правило, в гибридных и электрических транспортных средствах ЭБУ тормозной системы интегрирован с системой рекуперативного торможения, где до 30% кинетической энергии преобразуется в электрическую. Однако системы рекуперации энергии демонстрируют низкую эффективность в условиях сельскохозяйственных работ. При движении по полю на скоростях 5-15 км/ч кинетическая энергия трактора минимальна, что снижает возврат энергии при торможении до 5-8%. Кроме того, частые остановки и запуски (например, при маневрировании) увеличивают циклы заряда/разряда батареи, ускоряя ее износ.

ЭБУ кузовной электроникой представляет собой интегрированную подсистему, отвечающую за координацию функций, связанных с комфортом оператора, безопасностью и вспомогательными системами трактора [17].

В отличие от узкоспециализированных ЭБУ (двигателя, тормозной системы) данный модуль фокусируется на управлении периферийными устройствами, такими как освещение, климат-контроль, стеклоочистители, мультимедийные интерфейсы и системы связи.

Ключевой особенностью ЭБУ кузовной электроникой является адаптивность к условиям эксплуатации. Например, система автоматически регулирует яркость внешнего освещения на основе данных датчиков освещенности и *GPS*-координат, учитывая время суток и погодные условия. Важным аспектом является интеграция с системами точного земледелия [18]. ЭБУ кузовной электроникой взаимодействует с бортовым компьютером, обеспечивая передачу данных между навесным оборудованием и дисплеем оператора. Это позволяет визуализировать параметры работы плуга, сеялки или опрыскивателя в реальном времени, а также управлять ими через сенсорный интерфейс.

ЭБУ навигационной системой последовательно гибридного трактора с мотор-колесами представляет собой интегрированную платформу, обеспечивающую координацию пространственного позиционирования, маршрутизации и энергоэффективного управления движением в условиях точного земледелия. Данная система базируется на многоуровневой архитектуре, объединяющей глобальные навигационные спутниковые системы (*GNSS*), инерциальные измерительные модули, лидары, а также алгоритмы машинного обучения для адаптации к динамическим условиям эксплуатации [19]. Основная функция ЭБУ навигации заключается в минимизации энергопотребления гибридной силовой установки за счет оптимизации траектории движения, синхронизации работы мотор-колес и прогнозирования нагрузки на тяговую батарею.

ЭБУ климат-контролем представляет собой интеллектуальную подсистему, отвечающую за поддержание заданных параметров микроклимата в кабине оператора (температура, влажность, скорость воздушного потока) при минимальном энергопотреблении.

В условиях гибридной архитектуры, где тяговая батарея является ограниченным ресурсом, ключевой задачей ЭБУ становится оптимизация работы нагревательных, вентиляционных и охлаждающих устройств с учетом текущего состояния энергосистемы (уровень заряда тяговой батареи, нагрузка ДВС).

ЭБУ системой рулевого управления последовательного гибридного трактора с мотор-колесами представляет собой интеллектуальную платформу, обеспечивающую точное и адаптивное управление вектором движения в условиях переменной нагрузки, сложного рельефа и неоднородного сцепления с грунтом.

Данная система реализует принцип независимого управления мотор-колесами, что позволяет исключить традиционные механические компоненты (рулевые тяги, гидроусилители) и перейти к полностью электронному регулированию угла поворота и крутящего момента на каждом колесе. Основная задача ЭБУ заключается в синтезе сигналов от датчиков, прогнозировании динамических параметров движения и генерации управляющих воздействий, оптимизирующих энергопотребление и маневренность трактора.

ЭБУ приборной панелью является центральным интерфейсом взаимодействия оператора с системой трактора, обеспечивая визуализацию критических параметров, диагностику неисправностей и управление базовыми функциями. Основная задача ЭБУ – агрегация данных от датчиков, всех ЭБУ с последующей их обработкой и выводом на дисплей в формате, адаптированном для оператора.

ЭБУ валом отбора мощности (ВОМ) представляет собой интеллектуальную подсистему, обеспечивающую точное регулирование скорости и крутящего момента на валу, подключенном к навесному оборудованию (например, опрыскивателям, сеялкам, косилкам). В отличие от традиционных систем с механическим приводом от двигателя внутреннего сгорания, в данной архитектуре ВОМ питается от тягового электродвигателя, управляемого инвертором напряжения, что позволяет реализовать адаптивное управление с обратной связью по параметрам нагрузки и энергоэффективности.

ЭБУ гидравлической системой представляет собой интегрированную платформу, обеспечивающую точное регулирование параметров рабочей жидкости (давление, расход, направление) в режиме реального времени. Данная система заменяет механические и гидромеханические системы, реализуя адаптивное управление пропорциональ-

ми или сервоклапанами гидрораспределителя, что повышает энергоэффективность, точность позиционирования навесного оборудования и устойчивость к переменным нагрузкам.

Основная задача гидравлической системы ЭБУ состоит в координации работы гидравлического контура с учетом текущих требований к выполнению сельскохозяйственных операций (вспашка, подъем плуга, работа с фронтальными погрузчиками) и минимизация потерь энергии.

Выводы. В результате исследования разработаны ключевые аспекты, касающиеся внедрения электронной системы управления (ЭСУ) для последовательного гибридного трактора с мотор-колесами.

Внедрение гибридных тракторов с улучшенной ЭСУ способно существенно снизить углеродный след сельского хозяйства, который на данный момент составляет около 15% от суммарных объемов глобальных выбросов CO₂. Это стало особенно актуальным в свете глобальных изменений климата и ужесточения международных требований по снижению выбросов.

Последовательные гибридные системы представляют собой перспективное направление в сельском хозяйстве благодаря их уникальной архитектуре, где дизельный двигатель (ДВС) используется исключительно для генерации электроэнергии. Это позволяет двигателю работать в оптимальных режимах, что в свою очередь увеличивает его КПД до 42%, и значительно снижает расход топлива и выбросы CO₂.

Современные алгоритмы управления часто не учитывают динамические изменения, возникающие в процессе сельскохозяйственных работ, что может приводить к увеличению расхода топлива до 12-15%. Разработанная ЭСУ включает адаптивные алгоритмы, способные реагировать на изменения условий, такие как тип грунта, влажность и тип нагрузки, что способствует более эффективному использованию ресурсов.

Применение адаптивного управления, особенно с учетом динамических условий работы, может значительно продлить срок службы компонентов, таких как аккумуляторы и мотор-колеса, за счет оптимизации циклов заряда и разряда, а также предотвращения излишних нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фомин В.М. Анализ перспектив освоения водородных ресурсов в структуре энергопотребления АПК // *Тракторы и сельхозмашины*. 2014. №9. С. 11-14. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-65480>.
2. Дорохов А.С., Никитин Е.А., Павкин Д.Ю. Колесные роботизированные технические средства: опыт и перспективы использования на животноводческих комплексах // *Техника и оборудование для села*. 2022. №4(298). С. 16-21. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-16-21.
3. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. и др. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки AGRITECHNIKA 2019 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. №6. С. 28-40. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
4. Раков В.А., Литвинов В.И. Анализ экономической эффективности применения гибридного и электрическо-

- го двигателей в тракторах // *АгроЗооТехника*. 2020. Т. 3. N3. С. 5. DOI: 10.15838/alt.2020.3.3.5.
5. Раков В.А., Литвинов В.И. Оценка экономической эффективности использования комбинированных и электрических энергоустановок в сельскохозяйственных машинах // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2020. N59. С. 123-128. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-12123.
 6. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. и др. Приоритетные направления научно-технического развития отечественного тракторостроения // *Техника и оборудование для села*. 2021. N2(284). С. 2-7. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-2-7.
 7. Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л., Шогенов Ю.Х. и др. Конкурентоспособный комплекс техники и технологии для производства зерна и кормов // *Аграрная Наука Евро-Северо-Востока*. 2019. Т. 20. N3. С. 299-308. DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
 8. Завалишин В.В. Экономия топлива при генерации электроэнергии дизель-генераторной установкой с переменной частотой вращения дизеля // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2010. N3 (46). С. 128-135.
 9. Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Оценка средней за период эксплуатации дизель-генераторной установки переменной частоты вращения стоимости вырабатываемой электроэнергии // *Интеллектуальная электротехника*. 2020. N2(10). С. 29-42. DOI: 10.46960/2658-6754_2020_2_29.
 10. Карташов В.Я., Самойленко С.С. Особенности структурно-параметрической адаптации в цифровых системах мониторинга и управления // *Вестник Кемеровского государственного университета*. 2014. N2-1(58). С. 70-77.
 11. Совин К.Г., Андреева Д.В. Принцип работы CAN-шины сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2019. N10. С. 69-71. EDN: BZDKSA.
 12. Девянин С.Н., Бижаев А.В., Павлов Я.Д. и др. Параметрическая характеристика двигателя трактора по удельному расходу топлива // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N4. С. 68-74. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-68-74.
 13. Хандорин М.М., Букреев В.Г. Методика оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи при изменении температуры аккумулятора // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2017. Т. 20. N2. С. 120-122. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-120-122.
 14. Дмитриев К.С. Испытания работоспособности аккумуляторных батарей электропривода транспортного средства // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2023. N4(72). С. 574-583. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-58.
 15. Ситовский О.Ф., Деркач В.Л. Технология предпускового подогрева для подзаряжаемых гибридных электромобилей // *Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение*. 2018. N4(112). С. 79-82. EDN: FCLSYQ.
 16. Pradhan N.Ch., Sahoo P.K., Kushwaha D.K. et al. ANN-PID based automatic braking control system for small agricultural tractors. *Journal of Field Robotics*. 2024. Vol. 41. N8. 2805-2831. DOI: 10.1002/rob.22393.
 17. Vasile I., Tudor E., Sburlan I. et al. Optimization of the electronic control unit of electric-powered agricultural vehicles. *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14. N10. 267. DOI: 10.3390/wevj14100267.
 18. Докин Б.Д., Алетдинова А.А. Анализ прошлого и будущего автоматизации растениеводства с развитием технологий точного земледелия // *Вестник АПК Ставрополя*. 2021. N1(41). С. 10-14. DOI: 10.31279/2222-9345-2021-10-41-10-14.
 19. Hossain M.S., Rahman M., Rahman A. et al. Automatic navigation and self-driving technology in agricultural machinery: a state-of-the-art systematic review. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. 94370-94401. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3573324.

REFERENCES

1. Fomin V.M. Analysis of development prospects of hydrogen resources in the energy use pattern of agroindustrial complex. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2014. N9. 11-14 (In Russian). EDN: UAHLYR.
2. Dorokhov A.S., Nikitin E.A., Pavkin D.Yu. Wheeled robotic technical tools: experience and prospects of use at livestock complexes. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N4(298). 16-21 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-16-21.
3. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. et al. Modern agriculture technologies and equipment - trends of an Agritechnika 2019 exhibition. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020. N6. 28-40 (In Russian). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
4. Rakov V.A., Litvinov V.I. Economic value analysis of using hybrid and electric motors in tractors. *Agricultural and Livestock Technology*. 2020. N3. 5 (In Russian). DOI: 10.15838/alt.2020.3.3.5.
5. Rakov V.A., Litvinov V.I. Economic efficiency assessment of hybrid and electric motors using in tractors. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2020. N59. 123-128 (In Russian). DOI: 10.24411/2078-1318-2020-12123.
6. Lachuga Yu.F., Izmajlov A.Yu., Lobachevskij Ya.P. Priority areas of scientific and technical development of the domestic tractor industry. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N2(284). 2-7 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-2-2-7.

7. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Shogenov Yu.Kh. et al. Competitive complex of machinery and technologies for the production of grain and feed. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019. Vol. 20. N3. 299-308 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
8. Zavalishin V.V. Fuel economy in the process of electricity generating by diesel-generator set with variable frequency of diesel engine rotation. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2010. N3 (46). 128-135 (In Russian).
9. Dar'enkova A.B., Khvatov O.S. Evaluation of average cost of generated electricity for operation period of variable speed diesel generator set. *Smart Electrical Engineering*. 2020. N2 (10). 29-42 (In Russian). DOI: 10.46960/2658-6754_2020_2_29.
10. Kartashov V.Ya., Samoilenko S.S. Peculiarities of structural and parametric adaptation in digital systems of monitoring and management. *Bulletin of Kemerovo State University*. 2014. N2-1 (58). 70-77 (In Russian).
11. Sovin K.G., Andreeva D.V. The principle of operation of the CAN bus for agricultural equipment. *Agricultural Machinery: Service and Repair*. 2019. N10. 69-71 (In Russian). EDN: BZDKSA.
12. Devyanin S.N., Bizhaev A.V., Pavlov Ya.D. et al. Parametric characterization of a tractor engine by specific fuel consumption. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N4. 68-74 (In Russian). DOI:10.22314/2073-7599-2023-17-4-68-74.
13. Khandorin M.M., Bukreev V.G. Method to estimate the available capacity of a Lithium-ion battery when the battery temperature changes. *Proceedings of TUSUR University*. 2017. Vol. 20. N2. 120-122 (In Russian). DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-120-122.
14. Dmitriev K.S. Testing the performance of vehicle electric drive batteries. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2023. N4 (72). 574-583 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-04-58.
15. Sitovsky O.F., Derkach V.L. Technology of the preheating for plug-in hybrid electric vehicle. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2018. N4(112). 79-82 (In Russian). EDN: FCLSYQ.
16. Pradhan N.C., Sahoo P.K., Kushwaha D.K. et al. ANN-PID based automatic braking control system for small agricultural tractors. *Journal of Field Robotics*. 2024. Vol. 41. N8. 2805-2831 (In English). DOI: 10.1002/rob.22393.
17. Vasile I., Tudor E., Sburlan I. et al. Optimization of the electronic control unit of electric-powered agricultural vehicles. *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14. N10. 267 (In English). DOI: 10.3390/wevj14100267.
18. Dokin B.D., Aletdinova A.A. Analysis of the past and future of crop automation with the development of precision farming technologies. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2021. N1(41). 10-14 (In Russian). DOI: 10.31279/2222-9345-2021-10-41-10-14.
19. Hossain M.S., Rahman M., Rahman A. et al. Automatic navigation and self-driving technology in agricultural machinery: a state-of-the-art systematic review. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. 94370-94401 (In English). DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3573324.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Измайлов А.Ю. – научное руководство, формулирование основных целей и задач теоретических исследований, доработка текста;

Букреев А.В. – определение методологии исследования, разработка электронной системы управления, критический анализ и доработка решения, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;

Соловьев Р.Ю. – сбор и анализ материалов по теме исследования, разработка электронной системы управления, составление начального варианта статьи;

Соловьев Р.Р. – сбор и анализ материалов по теме исследования, составление начального варианта статьи, формирование общих выводов;

Даненков И.Д. – систематический отбор и всесторонний анализ научно-технической литературы и патентных источников по рассматриваемой

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Izmailov A.Yu. – scientific supervision, formulation of the main goals and objectives of theoretical research, revision of the manuscript;

Bukreev A.V. – development of the research methodology, development of the electronic control system, critical analysis and revision of the solution, formulation of the general conclusions, final revision of the manuscript;

Soloviev R.Yu. – collection and analysis of materials related to the research topic, development of the electronic control system, drafting the initial version of the manuscript;

Soloviev R.R. – collection and analysis of materials related to the research topic, drafting the initial version of the manuscript, formulation of the general conclusions;

Danekov I.D. – systematic selection and comprehensive analysis of scientific and technical literature and patent sources related to the problem under consideration, drafting the initial version of the manuscript.

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

30.09.2025

18.11.2025