

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ТЯГОВОГО РАСЧЕТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИБРИДНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МОДУЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ

Соловьев Р.Ю., Соловьев Р.Р., Букреев А.В.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия
vim@aleksey-bukreev.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования обусловлена методологическим разрывом между агротехническими требованиями к самоходным модульным платформам (тяговое усилие, рабочая скорость, масса) и параметрами, необходимыми для проектирования тяговых электродвигателей методом конечных элементов (внешняя скоростная характеристика (ВСХ), CPSR). Существующие методики не учитывают специфику индивидуального электропривода и современные возможности варьирования массы. ЦЕЛЬ. Разработать алгоритмизированную методику тягового расчета, обеспечивающую преобразование исходных агротехнических параметров в обоснованную внешнюю скоростную характеристику тягового электродвигателя для гибридных сельскохозяйственных модульных платформ с последовательной трансмиссией. МЕТОДЫ. Методика базируется на уравнениях тягового баланса, теории трактора и анализе эмпирических зависимостей. Ключевой особенностью является введение и системный учет коэффициента диапазона эксплуатационных масс и коэффициента возможной перегрузки, что позволяет перейти от дискретного задания масс к непрерывному диапазону. Расчет включает определение требуемой мощности, КПД (с учетом классов энергоэффективности), передаточных чисел редуктора и построение искомой внешней скоростной характеристики. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получено семейство внешних скоростных характеристик тяговых электродвигателей, демонстрирующее влияние варьируемых параметров на требуемый диапазон регулирования мощности (CPSR). Установлено, что увеличение расчетной рабочей скорости с 4 до 8 км/ч при фиксированном коэффициенте диапазона эксплуатационных масс, равному 1,66, позволяет снизить требуемый CPSR с 11,1 до 5,5. На основе уравнений тягового баланса выведен безразмерный комплекс CPSR, обобщающий влияние скоростного фактора, сцепления, балластирования и перегрузки. Обоснована стратегия унификации тяговых двигателей внутри модельного ряда, при которой один типоразмер тяговых электродвигателей покрывает требования всей серии за счет программного смещения базовой точки на ВСХ без пересчета электромагнитной системы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная методика устраняет методологический разрыв между механическим и электромагнитным моделированием, выступая связующим звеном в сквозном цифровом цикле проектирования. Она позволяет формировать корректное техническое задание на проектирование электрических машин, оптимизировать конструкцию тяговых электродвигателей под реальные условия эксплуатации с переменной массой и динамическими нагрузками, а также сокращает время итераций между смежными дисциплинами.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель; электрическая машина; сельскохозяйственный трактор; самоходная модульная платформа; мобильное энергетическое средство МЭС; индивидуальный привод колёс; электромеханическая трансмиссия; электрическая трансмиссия.

Для цитирования: Соловьев Р.Ю., Соловьев Р.Р., Букреев А.В. Совершенствование методики тягового расчета при проектировании электропривода гибридных сельскохозяйственных модульных платформ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-49-62.

IMPROVEMENT OF THE TRACTION CALCULATION METHODOLOGY FOR THE ELECTRIC DRIVE DESIGN OF HYBRID AGRICULTURAL MODULAR PLATFORMS

Solovyov R.Y.U., Solovyov R.R., Bukreev A.V.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

soll.rom@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE* of this study stems from the methodological gap between the agrotechnical requirements for self-propelled modular platforms (drawbar pull, operating speed, mass) and the parameters necessary for designing traction electric motors using the finite element method (external speed characteristic (ESC), CPSR). Existing methods do not account for the specifics of individual electric drives and the modern possibilities of mass variation. *THE PURPOSE.* To develop an algorithmic traction calculation methodology that transforms the initial agrotechnical parameters into a well-founded external speed characteristic of a traction electric motor for hybrid agricultural modular platforms with series transmission. *METHODS.* The methodology is based on traction balance equations, classical tractor theory, and analysis of empirical dependencies. A key feature is the introduction and systematic consideration of the operational mass range coefficient and the overload capability coefficient, enabling a transition from discrete mass settings to a continuous range. The calculation includes determining the required power, efficiency (taking into account energy efficiency classes), reduction gear ratios, and constructing the desired external speed characteristic. *RESULTS.* A family of external speed characteristics of traction electric motors was obtained, demonstrating the influence of varying parameters on the required Constant Power Speed Ratio (CPSR). It was found that increasing the design operating speed from 4 to 8 km/h with a fixed operational mass range coefficient of 1.66 reduces the required CPSR from 11.1 to 5.5. Based on the traction balance equations, a dimensionless complex for CPSR was derived, generalizing the influence of the speed factor, adhesion factor, ballasting factor, and overload factor. A strategy for unifying traction motors within a model series is substantiated: a single motor size covers the requirements of the entire series by software shifting of the base point on the ESC without recalculating the electromagnetic system. *CONCLUSIONS.* The developed methodology bridges the methodological gap between mechanical and electromagnetic modeling, acting as a crucial link in a closed-loop digital design cycle. It enables the formulation of accurate technical specifications for designing electric machines, optimizes the traction motor design for real operating conditions with variable mass and dynamic loads, and significantly reduces iteration time between interrelated engineering disciplines.

Keywords: *traction electric motor; electric machine; agricultural tractor; self-propelled modular platform; mobile power unit (MPU); electromechanical transmission; electric transmission.*

For citation: Solovyov R.Y.U., Solovyov R.R., Bukreev A.V. Improvement of the traction calculation methodology for the electric drive design of hybrid agricultural modular platforms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-49-62.

Введение (Introduction)

Мировые тренды в области сельскохозяйственного машиностроения ориентированы на создание высокоавтоматизированных и автономных тракторов. Наиболее перспективной архитектурой признаны самоходные модульные платформы (СМП) с гибридными силовыми установками и индивидуальным электроприводом колес. Примеры таких платформ уже существуют за рубежом (универсальная EOX Tractors 175, специализированные VitiBot Bakus, Naïo Technologies TED, EXXACT Robotics TRAXX, адаптивная Sitia Trektor) и в России (Т-240, «Интермашхолдинг»). Однако реализация данного подхода требует решения комплексной междисциплинарной задачи, объединяющей методы классического тракторостроения, силовой электроники и проектирования электрических машин.

Ключевая проблема, возникающая на стыке этих областей, заключается в

методологическом разрыве между исходными данными и конечным результатом проектирования. Инженеры, разрабатывающие СМП, оперируют традиционными агротехническими параметрами: требуемым тяговым усилием на крюке, рабочими скоростями, диапазоном эксплуатационных масс и типом двигателя. Однако эти параметры не могут быть напрямую использованы для проектирования тяговых электродвигателей (ТЭД) с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Для последних критически важна целевая внешняя скоростная характеристика (ВСХ) с четко определенными зонами постоянства момента и мощности, а также значением отношения максимальной частоты вращения к частоте вращения при выходе на постоянную мощность (CPSR).

Отсутствие формализованной процедуры преобразования агротехнических требований в параметры ВСХ ТЭД приводит к проектным неопределенностям: либо к неоправданному завышению характеристик и удорожанию электропривода, либо к его неспособности эффективно работать в реальных условиях, в частности, с переменным балластом и при низкочастотных (~1 Гц) динамических нагрузках от почвообрабатывающих орудий. Классические методики тягового расчета, разработанные для тракторов с механическими трансмиссиями, не учитывают специфику электропривода и современные возможности варьирования массы.

Для преодоления указанного разрыва в данной работе предлагается комплексная алгоритмизированная методика, которая выполняет роль связующего звена. Она на строгой расчетной основе трансформирует входные агротехнические данные в требования к ВСХ ТЭД, пригодные для последующего моделирования в САЕ-пакетах (Motor-CAD, Altair Flux и др.), обеспечивая тем самым сквозной цифровой цикл проектирования СМП. Особенностью подхода является системный учет коэффициента диапазона эксплуатационных масс ($k_{d,масс}$) и коэффициента возможной перегрузки (v_c), что позволяет более точно обосновать требования к CPSR.

Цель исследования заключается в разработке методики тягового расчета, обеспечивающей формирование обоснованной внешней скоростной характеристики тягового электродвигателя на основе заданных агротехнических параметров самоходной модульной платформы с последовательной гибридной трансмиссией.

Научная значимость исследования состоит в установлении аналитических зависимостей между агротехническими параметрами СМП (диапазон балластирования, рабочая скорость, тяговое усилие) и ключевыми характеристиками ТЭД (CPSR, момент, мощность), а также в обосновании принципа унификации тяговых двигателей внутри модельного ряда за счет программного смещения базовой точки характеристики.

Практическая значимость исследования заключается в создании инструмента, позволяющего инженерам формировать корректное техническое задание на проектирование электрических машин, сокращая время итераций между механическим и электромагнитным моделированием, и оптимизировать конструкцию ТЭД под реальные условия эксплуатации, включая работу с переменной массой и динамическими нагрузками.

Литературный обзор (Literature Review)

В соответствии с современными концепциями развития агроинженерных систем, перспективные высокотехнологичные тракторы сельскохозяйственного назначения целесообразно разрабатывать на базе СМП, оснащенных гибридными силовыми установками последовательного типа [1, 2]. В работе [3] также обосновывается перспективность данного направления. Отмечается, что СМП с гибридной силовой установкой должны комплектоваться мотор-колесами [4]. Указанный подход согласуется с глобальным трендом, направленным на создание высокоавтоматизированных и полностью автономных мобильных энергетических средств, что подтверждается исследованиями [5, 6]. Вопросы обеспечения автономности также рассматриваются в публикации [7].

Как показывают фундаментальные исследования в области топологий гибридных транспортных средств, последовательная схема предоставляет наибольшую гибкость в управлении моментом на каждом колесе, что критически важно для сельскохозяйственных операций [8].

Проектирование автономных СМП в современных условиях представляет собой комплексную междисциплинарную задачу, интегрирующую классическое тракторостроение, силовую электронику и проектирование электрических машин [9]. Методологический разрыв, исторически сложившийся между указанными дисциплинами, порождает существенные трудности. Инженеры, осуществляющие

проектирование СМП, руководствуются традиционными методиками и формулируют требования в терминах тягового усилия на крюке, рабочих скоростей движения и диапазона эксплуатационных масс. Однако данные параметры не могут быть непосредственно использованы в качестве входных данных при проектировании ТЭД с применением МКЭ. Для последних определяющее значение имеет целевая ВСХ, представляющая собой зависимость крутящего момента от частоты вращения $M(n)$ с четко выраженными зонами постоянства момента и постоянства мощности.

В мировом научном сообществе вопросам формирования диапазона регулирования мощности (Constant Power Speed Ratio, CPSR) и его влияния на конструкцию ротора (например, для машин с внутренними постоянными магнитами) уделяется первостепенное внимание. В частности, в работе [10, 11] показано, что высокие значения CPSR требуют специфической электромагнитной геометрии, что напрямую связывает агротехнические требования с конструкцией ТЭД.

В настоящее время отсутствует формализованная процедура трансформации агротехнических требований в параметры ВСХ ТЭД, что обуславливает риск неоптимального завышения характеристик разрабатываемого двигателя либо его несоответствия реальным эксплуатационным условиям, включая функционирование СМП с переменной балластировкой. Особую сложность представляет учет низкочастотных (порядка 1 Гц) колебаний нагрузки, генерируемых почвообрабатывающими орудиями¹, которые требуют обеспечения запаса по моменту (v_c), а не только кратковременной перегрузочной способности.

Современные зарубежные исследования, например, моделирование пахотных агрегатов [12], подтверждают, что именно динамика взаимодействия рабочего органа с почвой формирует наиболее жесткие требования к перегрузочной способности тягового электропривода.

Изложенное обуславливает необходимость тягового расчета как ключевого этапа разработки СМП. В настоящей работе расчет выполнен для платформы с равновеликими колесами по схеме 4К46, оснащенной последовательной гибридной электромеханической бездиапазонной трансмиссией с индивидуальным приводом колес; на его основе получена ВСХ электродвигателя.

Классические методики, изложенные в трудах Е.Д. Львова и Г.М. Кутькова, были разработаны в период, когда сельскохозяйственные тракторы (СМП) не обладали современной гибкостью в части балластировки и широким диапазоном соотношения массы к мощности. Кроме того, в классических работах не рассматривались СМП с электроприводом колёс. Вопросы перераспределения мощности в трансмиссиях многоосных машин, являющиеся ключевыми для индивидуального привода колес, детально рассмотрены в работе [13], где предложен синергетический подход к управлению тягово-скоростными свойствами.

На современном этапе вопросы проектирования СМП с электромеханическими трансмиссиями получили развитие в исследованиях [14, 15], где рассматривается сочетание электродвигателя с механической трансмиссией. Исследование [16] также вносит вклад в разработку данного направления.

В работе Д.С. Солдатенко² продемонстрирована взаимосвязь между механическими и электрическими характеристиками привода, обеспечивающая достижение требуемых технико-экономических показателей. В данной работе акцент сделан на электрических параметрах, но на практике при проектировании ТЭД методом конечных элементов первостепенное значение имеют корректно заданные механические характеристики; задача анализа МКЭ ТЭД заключается в подтверждении данных характеристик. Одним из основных результатов тягового расчета является механическая ВСХ ТЭД, которая служит одним из ключевых входных технических требований для моделирования в программных комплексах, реализующих МКЭ. Таким образом, ВСХ выполняет функцию связующего элемента между механическим моделированием СМП и электромагнитным моделированием ТЭД.

Развитию методов численного моделирования электрических машин и повышению их энергоэффективности посвящены работы [17, 18]. Так, в [17] методом конечных элементов исследовалось влияние компенсирующих устройств на

¹Анилович В. Я., Водолажченко Ю. Т. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов: Справочное пособие. Машиностроение. М., 1966. 520 с.

²Солдатенко Д. С. Расчет электромеханических параметров тягового электропривода тракторов // Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Т. 8. С. 129-131.

электромагнитный момент погружного электродвигателя, что демонстрирует возможности численного моделирования при проектировании электрических машин. В [18] представлена оптимизация векторного управления асинхронным двигателем с комбинированной обмоткой, позволяющая снизить потери мощности, что актуально для повышения КПД тяговых электроприводов.

Вопросы обеспечения качества электроэнергии и надёжности электроприводов рассмотрены в работе [19], где методом компьютерного моделирования исследовано применение динамического компенсатора искажений напряжения (ДКИН) для системы многодвигательного привода ленточного конвейера. Показано, что ДКИН позволяет эффективно компенсировать провалы и несимметрию напряжения, предотвращая перегрузки и потерю устойчивости привода. Для практической реализации и тестирования систем управления частотно-регулируемыми электроприводами актуальными являются стендовые испытания. В работе [20] представлен разработанный стенд для исследования работоспособности преобразователей частоты после капитального ремонта, что соответствует задачам обеспечения надёжности электротехнических комплексов в условиях реальной эксплуатации.

Материалы и методы (Materials and methods)

Тяговый расчет представляет собой один из этапов общей методики, включающей следующие последовательные стадии:

1. Тяговый расчет – на основе исходных агротехнических и энергетических параметров (приведены ниже) формируется целевая (эталонная) внешняя скоростная характеристика ТЭД.

2. МКЭ-проектирование – осуществляется варьирование геометрических и электромагнитных параметров тягового электродвигателя с целью получения реализуемой механической характеристики и иных параметров ТЭД, удовлетворяющих заданным требованиям.

3. Верификация – проводится сравнительный анализ внешней скоростной характеристики, полученной в результате МКЭ-моделирования, с эталонной ВСХ. При их совпадении в пределах установленного допуска подтверждается соответствие тягово-динамических свойств самоходной модульной платформы расчетным условиям эксплуатации.

4. Техничко-экономическая оценка – выполняется анализ соответствия разработанного двигателя стоимостным, агротехническим и энергетическим требованиям. В случае выявления несоответствия производится итерационный пересмотр исходных требований к СМП либо корректировка структуры модельного ряда платформ.

При проведении тягового расчета приняты следующие допущения: движение СМП рассматривается как установившееся на горизонтальной поверхности; ввиду низкоскоростного режима движения при выполнении полевых работ сопротивление воздуха и инерционные силы не учитываются; коэффициент использования веса трактора $\varphi_{кр}$ принимается неизменным при изменении массы СМП за счет установки балласта; детальный расчет параметров буферного накопителя энергии, равно как и накопителя при отсутствии двигателя внутреннего сгорания, не приводится, поскольку является предметом отдельного исследования.

Исходными данными для тягового расчета служат такие параметры как: назначение СМП; тип движителя [21]; коэффициент учитывающий долю веса, приходящуюся на ведущие колёса λ_k ; номинальное тяговое усилие $P_{кр\ n.макс}$, Н (для случая максимальной допустимой массы СМП); тяговый класс или классы; допустимое буксование движителей δ_n ; максимальная транспортная скорость $V_{макс.д}$; коэффициент использования веса трактора $\varphi_{кр.н}$; коэффициент сопротивления качению f_k ; КПД механической части трансмиссии $\eta_{мех}$ и генератора $\eta_{ген}$; передаточные числа ступеней редуктора $u_{ред}$, максимальная частота вращения вала ТЭД $n_{эл.макс}$, об/мин; число ведущих колёс и общее число колёс n_k ; статический радиус колеса r_k , м, а так же эмпирические зависимости буксования от коэффициента использования веса трактора $\varphi_{кр}$.

Дополнительно в методику предлагается ввести следующие параметры: класс энергоэффективности электродвигателя (в настоящее время выделяют пять классов от IE1 до IE5) [22]; коэффициент диапазона эксплуатационных масс; коэффициент возможной перегрузки; а также максимальную скорость при номинальном тяговом усилии (в рассматриваемом случае - при максимально допустимой массе СМП). Введение указанных коэффициентов позволяет скорректировать диапазон значений, традиционно используемых в классических методиках.

Расчет эксплуатационного максимального веса и максимально допустимый массы СМП выполняется по формуле (1):

$$G_{\text{тр.макс}} = \frac{P_{\text{кр н.макс}}}{\varphi_{\text{кр н}} \cdot \lambda_{\text{к}}} [\text{Н}], m_{\text{тр.макс}} = \frac{G_{\text{тр.макс}}}{g} [\text{кг}], \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\lambda_{\text{к}}$ – коэффициент учитывающий долю веса, приходящуюся на ведущие колёса. Не учитывается так как все колёса СМП ведущие, равен 1.

Вопрос корректировки тягового расчёта для тракторов тягово-энергетической концепции (СМП) был детально рассмотрен в работе [23]. Согласно предложенной ими методике, эксплуатационный вес СМП определяется дискретно для двух крайних вариантов: базовой машины без балласта и полностью забалластированного агрегата. Вопросы балластировки так же изучались в работах [24, 25]. В развитие данного подхода, предлагается переход от дискретного задания двух масс к использованию единого коэффициента диапазона эксплуатационных масс $k_{\text{д.масс}}$. Вместо двух независимых входных параметров вводится зависимость согласно формуле (2):

$$m_{\text{тр.мин}} = \frac{m_{\text{тр.макс}}}{k_{\text{д.масс}}} [\text{кг}]. \quad (2)$$

Расчёт мощности, требуемой на ТЭД, выполняется по формуле (3):

$$N_{\text{н.э.эд}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} + G_{\text{тр.макс}} \cdot f_{\text{к}}) v_{\text{тр}}}{\eta_{\text{мех}} (1 - \delta_{\text{н}})} [\text{Вт}], \quad (3)$$

где $P_f = f_{\text{к}} G_{\text{тр.макс}}$ – сила сопротивления качению, Н; максимальная скорость при номинальном тяговом усилии $v_{\text{тр}}$, в м/с;

На основе полученной требуемой мощности ТЭД, определяется КПД ТЭД IE5 класса энергоэффективности для номинальных оборотов по ГОСТ IEC/TS 60034-30-2-2021 по формуле (4):

$$\eta_{\text{эд}} = \frac{A \cdot \left(\log \left(\frac{N_{\text{н.э.эд}}}{n_{\text{к}} \cdot 1000} \right) \right)^3 + B \cdot \left(\log \left(\frac{N_{\text{н.э.эд}}}{n_{\text{к}} \cdot 1000} \right) \right)^2 + C \cdot \left(\log \left(\frac{N_{\text{н.э.эд}}}{n_{\text{к}} \cdot 1000} \right) \right) + D}{100}, \quad (4)$$

где А, В, С, Д – указаны в ГОСТ IEC/TS 60034-30-2-2021.

Для разных классов энергоэффективности и диапазонов номинальных частот данные значения корректируются.

По формуле (5), определяется КПД ТЭД, с учётом дополнительных потерь, вызванных гармониками напряжения и тока:

$$\eta_{\text{эд.пр}} = \frac{1}{1 + (1 + 0,15) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{эд}}} - 1 \right)}. \quad (5)$$

КПД трансмиссии рассчитывается по формуле (6):

$$\eta_{\text{тр}} = \eta_{\text{ген}} \cdot \eta_{\text{эд.пр}} \cdot \eta_{\text{мех}}. \quad (6)$$

Номинальная мощность ДВС, генератора, и колёс рассчитывается по формулам (7)-(9):

$$N_{\text{н.э.двс}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} + G_{\text{тр.макс}} \cdot f_{\text{к}}) v_{\text{тр}}}{\eta_{\text{ген}} \cdot \eta_{\text{эд.пр}} \cdot \eta_{\text{мех}} (1 - \delta_{\text{н}})} [\text{Вт}], \quad (7)$$

$$N_{\text{н.э.ген}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} + G_{\text{тр.макс}} \cdot f_{\text{к}}) v_{\text{тр}}}{\eta_{\text{эд.пр}} \cdot \eta_{\text{мех}} (1 - \delta_{\text{н}})} [\text{Вт}], \quad (8)$$

$$N_{\text{н.э.к}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} + G_{\text{тр.макс}} \cdot f_{\text{к}}) v_{\text{тр}}}{(1 - \delta_{\text{н}})} [\text{Вт}]. \quad (9)$$

Номинальная скорость и номинальное тяговое усилие при эксплуатации трактора при минимальной массе определяется по формулам (10) и (11):

$$v_{\text{тр.мин}} = \frac{N_{\text{н.э.ДВС}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot (1 - \delta_{\text{н}}) \cdot 3.6}{m_{\text{тр.мин}} \cdot \left(1 + \frac{f_{\text{к}}}{\varphi_{\text{кр н}}}\right) \cdot \varphi_{\text{кр н}} \cdot g} \text{ [км/ч]}, \quad (10)$$

$$P_{\text{кр н.мин}} = \varphi_{\text{кр н}} \cdot m_{\text{тр.мин}} \cdot g \text{ [Н]}. \quad (11)$$

Расчёт значений энергонасыщенности для максимально допустимой (забалластированной) массы и для минимальной (сухой) массы выполняется по формулам (12) и (13):

$$\mathcal{E}_{\text{тр.макс}} = \frac{N_{\text{н.э.ДВС}}}{m_{\text{тр.макс}} \cdot g} \text{ [Вт/Н]}, \quad (12)$$

$$\mathcal{E}_{\text{тр.мин}} = \frac{N_{\text{н.э.ДВС}}}{m_{\text{тр.мин}} \cdot g} \text{ [Вт/Н]}. \quad (13)$$

Определение требуемого передаточного числа редуктора производится исходя из условия обеспечения транспортной скорости при максимально допустимой частоте вращения вала ТЭД. В конструкции трансмиссии используется двухрядная планетарная схема с заторможенным водилом одной из ступеней. Передаточное число для такой кинематической схемы определяется по формуле (14)³:

$$u_{\text{тр}} = -(1 - (u_{\text{ряд1}} + 1) \cdot (u_{\text{ряд2}} + 1)). \quad (14)$$

Максимальная транспортная скорость трактора по кинематике, без буксования, при данном передаточном числе редуктора рассчитывается по формуле (15):

$$V_{\text{макс.д}} = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot n_{\text{эл.макс}} \cdot r_{\text{к}}}{30 \cdot u_{\text{тр}}} \text{ [км/ч]}. \quad (15)$$

Передаточное число подбирается таким образом, чтобы обеспечивалась заданная максимальная скорость.

Построение внешней скоростной характеристики ТЭД для случая работы трактора с максимальной допустимой массой, при работе электродвигателя на номинальном режиме и при работе на кратковременной характеристике, равной $2M_{\text{од.эд.ном}}$, выполняется в следующем порядке.

Сила тяги на колёсах при номинальном тяговом усилии рассчитывается по формуле (16):

$$P_{\text{к.н}} = P_{\text{кр н.макс}} + P_f \text{ [Н]}. \quad (16)$$

Поправка для учёта коэффициента возможной перегрузки определяется по формуле (17):

$$\Delta_{\text{к}} = \frac{(P_{\text{кр н.макс}} \cdot v_{\text{с}}) + P_f}{P_{\text{кр н.макс}} + P_f}. \quad (17)$$

Требуемый номинальный момент электродвигателя рассчитывается по формуле (18):

$$M_{\text{н.эд.ном}} = \frac{P_{\text{кр н.макс}} \cdot \Delta_{\text{к}} \cdot r_{\text{к}}}{\eta_{\text{мех}} \cdot u_{\text{тр}} \cdot n_{\text{к}}} \text{ [Нм]}. \quad (18)$$

Номинальная частота вращения электродвигателя определяется по формуле (19):

$$n_{\text{н.эл.двиг}} = \frac{N_{\text{н.эд}} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot M_{\text{н.эд.ном}} \cdot n_{\text{к}}} \text{ [об/мин]}. \quad (19)$$

Формируется столбец значений частот вращения вала электродвигателя по формулам (19) и (20):

$$n_{\text{эл.двиг},i,0} = n_{\text{эл.мин}} + \Delta \cdot i \text{ [об/мин]}, \quad (20)$$

$$\Delta = \frac{(n_{\text{эл.макс}} - n_{\text{эл.мин}})}{a_{\text{к}}}. \quad (21)$$

где $n_{\text{эл.мин}}$ – минимальные обороты вала электродвигателя, об/мин;

³Кудрявцев В. Н., Кирдяшев Ю. Н., Гинзбург Е.Г. и др. Планетарные передачи. Машиностроение. Л. 1977. 535 с.

a_k, i – значения для шага расчёта, из них формируются таблицы и графики.

В сформированный столбец добавляется значение $n_{н.эл.двиг}$, после чего проводится сортировка значений в столбце от наименьшего к большему.

На основе полученного столбца с частотой вращения вала электродвигателя и номинальной мощности электродвигателя находится требуемый суммарный крутящий момент на всех колёсах. Расчёт выполняется с ограничением крутящего момента, необходимого для реализации заданного тягового усилия по формуле (22):

$$M_{эд.ном,i,0} = \frac{N_{н.эд} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_{эл.двиг,i,0}}. \quad (22)$$

С условием если $M_{эд.ном,i,0} > \frac{P_{кр н.макс} \cdot \Delta_k \cdot r_k}{\eta_{мех} \cdot u_{тр}}$, то $M_{эд.ном,i,0} = \frac{P_{кр н.макс} \cdot \Delta_k \cdot r_k}{\eta_{мех} \cdot u_{тр}}$ [Нм].

В результате получены значения общего номинального крутящего момента.

Значения номинального крутящего момента для одного электродвигателя, с учётом количества ведущих колёс, определяются по формуле (23):

$$M_{од.эд.ном,i,0} = \frac{M_{эд.ном,i,0}}{n_k} \text{ [Нм]}. \quad (23)$$

На основе столбцов с крутящим моментом и частотой вращения находится общая требуемая мощность по формуле (24):

$$N_{эд.ном,i,0} = M_{эд.ном,i,0} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{эл.двиг,i,0}}{60 \cdot 10^3} \text{ [кВт]}. \quad (24)$$

Мощность на одном электродвигателе рассчитывается с учётом количества ведущих колёс по формуле (25):

$$N_{од.эд.ном,i,0} = \frac{N_{эд.ном,i,0}}{n_k} \text{ [кВт]}. \quad (25)$$

Дальнейший расчёт ведётся в соответствии с методикой, изложенной в начале раздела.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В ходе работы алгоритма, для примера была построена требуемая идеальная внешняя скоростная характеристика ТЭД (рисунок 1).

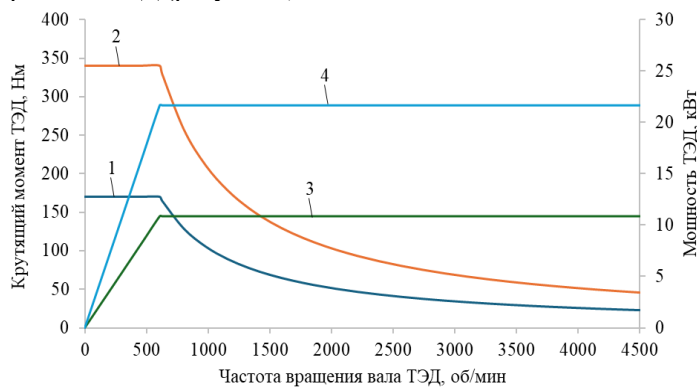


Рис. 1. Полученная идеальная внешняя скоростная характеристика ТЭД (зависимость мощности и крутящего момента от частоты вращения вала) 1 – Номинальный крутящий момент ТЭД, Нм; 2 – Кратковременный крутящий момент ТЭД, Нм; 3 – Номинальная мощность ТЭД, кВт; 4 – Кратковременная мощность ТЭД, кВт

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Выбор коэффициента диапазона эксплуатационных масс, коэффициента возможной перегрузки и расчетной максимальной скорости при номинальном тяговом усилии, а также максимальной скорости СМП, оказывает определяющее влияние на ключевой параметр тягового электродвигателя отношение максимальной частоты вращения

двигателя к частоте вращения, при которой крутящий момент перестает быть постоянным в заданном режиме работы (базовая точка работы) - CPSR.

Семейство полученных кривых (рисунок 2) показывает, как варьирование этих параметров изменяет требования к CPSR и определяет необходимый запас крутящего момента для обеспечения стабильной тяги. Основные параметры одинаковые для всех расчётов: $\varphi_{кр.н} = 0,42$; $f_k = 0,08$; $r_k = 0,666$ м; $V_{макс.д} = 40$ км/ч.

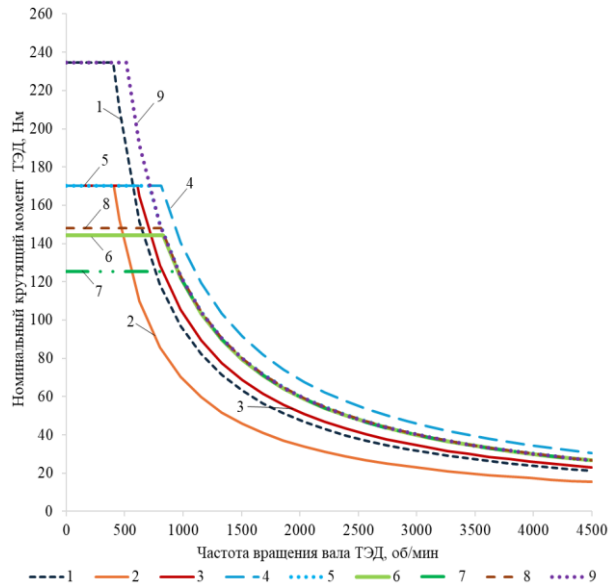


Рис. 2. Результаты расчёта тяговых характеристик ТЭД при различных комбинациях коэффициентов и скоростей для номинального режима работы

- 1 – $P_{кр.н} = 25$ кН, $V_{тр} = 4$ км/ч, $v_c = 1,35$, $k_{д.масс} = 2,28$, $N_{н.э.ДВС} = 44,29$ кВт, $CPSR = 11,1$, $\mathcal{E}_{тр.макс} = 0,744$, $\mathcal{E}_{тр.мин} = 1,697$, $m_{мин} = 2662$ кг, $m_{макс} = 6070$ кг;
- 2 – $P_{кр.н} = 18,1$ кН, $V_{тр} = 4$ км/ч, $v_c = 1,35$, $k_{д.масс} = 1,66$, $N_{н.э.ДВС} = 32,3$ кВт, $CPSR = 11,1$, $\mathcal{E}_{тр.макс} = 0,749$, $\mathcal{E}_{тр.мин} = 1,243$, $m_{мин} = 2651$ кг, $m_{макс} = 4400$ кг;
- 3 – $P_{кр.н} = 18,1$ кН, $V_{тр} = 6$ км/ч, $v_c = 1,35$, $k_{д.масс} = 1,66$, $N_{н.э.ДВС} = 48$ кВт, $CPSR = 7,4$, $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,114$, $\mathcal{E}_{тр.мин} = 1,85$, $m_{мин} = 2651$ кг, $m_{макс} = 4400$ кг;
- 4 – $P_{кр.н} = 18,1$ кН, $V_{тр} = 8$ км/ч, $v_c = 1,35$, $k_{д.масс} = 1,66$, $N_{н.э.ДВС} = 63,8$ кВт, $CPSR = 5,581$, $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,478$, $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,454$, $m_{мин} = 2651$ кг, $m_{макс} = 4400$ кг;
- 5 – $P_{кр.н} = 18,1$ кН, $V_{тр} = 7$ км/ч, $v_c = 1,35$, $k_{д.масс} = 1,66$, $N_{н.э.ДВС} = 55,9$ кВт, $CPSR = 6,3$, $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,296$, $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,152$, $m_{мин} = 2651$ кг, $m_{макс} = 4400$ кг;
- 6 – $P_{кр.н} = 15,4$ кН, $V_{тр} = 8,2$ км/ч, $v_c = 1,35$, $k_{д.масс} = 1,4$, $N_{н.э.ДВС} = 55,5$ кВт, $CPSR = 5,445$, $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,519$, $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,127$, $m_{мин} = 2662$ кг, $m_{макс} = 3727$ кг;
- 7 – $P_{кр.н} = 15,4$ кН, $V_{тр} = 8,2$ км/ч, $v_c = 1,1$, $k_{д.масс} = 1,4$, $N_{н.э.ДВС} = 55,5$ кВт, $CPSR = 4,72$, $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,519$, $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,127$, $m_{мин} = 2662$ кг, $m_{макс} = 3727$ кг;
- 8 – $P_{кр.н} = 18,1$ кН, $V_{тр} = 7$ км/ч, $v_c = 1,1$, $k_{д.масс} = 1,66$, $N_{н.э.ДВС} = 55,9$ кВт, $CPSR = 5,52$, $\mathcal{E}_{тр.макс} = 1,296$, $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,152$, $m_{мин} = 2651$ кг, $m_{макс} = 4400$ кг;
- 9 – $P_{кр.н} = 25$ кН, $V_{тр} = 5,06$ км/ч, $v_c = 1,3$, $k_{д.масс} = 2,28$, $N_{н.э.ДВС} = 55,8$ кВт, $CPSR = 8,824$, $\mathcal{E}_{тр.макс} = 0,937$, $\mathcal{E}_{тр.мин} = 2,137$, $m_{мин} = 2662$ кг, $m_{макс} = 6070$ кг

Fig 2. Results of calculating the traction characteristics of a traction electric motor for various combinations of coefficients and speeds for the nominal operating mode

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ семейства полученных характеристик подтверждает, что требования к диапазону регулирования ТЭД находятся в прямой зависимости от агротехнических параметров СМП. Установлено, что увеличение расчетной скорости $v_{тр}$, например, при коэффициенте балластирования $K_{диап.масс} = 1,66$ позволяет снизить требуемый CPSR с 11,1 до 5,5. Это доказывает, что варьирование эксплуатационных параметров СМП в рамках предложенного алгоритма позволяет оптимизировать требования к электроприводу, исключая избыточность его характеристик. Полученные кривые являются законченным техническим заданием для этапа МКЭ-проектирования.

Обобщая результаты параметрического анализа, можно представить требуемый диапазон регулирования в виде безразмерного комплекса, выведенного из

уравнений тягового баланса (3), (18) и (19). С учетом условия постоянства мощности на валу, CPSR выражается как:

$$CPSR = \frac{V_{\text{трансп}}}{v_{\text{тр}}} \cdot \frac{1}{k_{\text{д.масс}}} \cdot \frac{1}{v_c} \cdot \frac{P_{\text{кр.н}} + P_f}{P_f} \cdot \eta, \quad (26)$$

где P_f — сила сопротивления качению;

η — общий КПД трансмиссии.

Введя безразмерные факторы:

- скоростной фактор $\Pi_v = \frac{V_{\text{трансп}}}{v_{\text{тр}}}$;
- фактор балластировки $\Pi_m = k_{\text{д.масс}}$;
- фактор перегрузки $\Pi_{ov} = v_c$;
- фактор сцепления $\Pi_f = \frac{P_{\text{кр.н}} + P_f}{P_f} = 1 + \frac{1}{f_k \cdot \varphi_{\text{кр}}}$;

получаем компактную аналитическую зависимость:

$$CPSR = \frac{\Pi_v \cdot \Pi_f \cdot \eta}{\Pi_m \cdot \Pi_{ov}}. \quad (27)$$

Данное выражение позволяет перейти от численного перебора вариантов к прямой оценке влияния каждого фактора на конструктивные требования к электродвигателю. Оно наглядно демонстрирует, что CPSR прямо пропорционален запасу по скорости и сцеплению и обратно пропорционален диапазону масс и коэффициенту перегрузки, что полностью согласуется с данными рисунка 2.

Установлено критическое влияние коэффициентов на положение базовой точки ВСХ и, как следствие, на диапазон регулирования мощности (CPSR). Это позволило предложить стратегию унификации ТЭД внутри серии: проектирование электрической машины ведется по критерию максимального крутящего момента для наиболее мощной модели. При этом показано, что один и тот же типоразмер ТЭД способен перекрыть требования всей серии: для энергонасыщенных моделей он работает в режиме с относительно низким CPSR (за счет высокой частоты вращения точки перехода), в то время как для менее мощных моделей ТЭД обеспечивает высокий CPSR, реализуя требования по тяге при ограничении со стороны мощности ДВС. Адаптация привода под конкретную модель осуществляется исключительно путем смещения базовой точки на ВСХ, что не требует пересчета электромагнитной системы в программах МКЭ.

Заключение или Выводы (Conclusions)

Разработана алгоритмизированная методика тягового расчета, которая устраняет методологический разрыв между агротехническими требованиями к самоходной модульной платформе и параметрами внешней скоростной характеристики, необходимыми для проектирования тягового электродвигателя методом конечных элементов.

Разработанная методика базируется на допущениях об установившемся движении на горизонтальной поверхности без учёта сопротивления воздуха и инерционных сил, неизменности коэффициента использования веса $\varphi_{\text{кр}}$ при балластировании и отсутствии расчёта накопителей энергии, ориентирована на СМП с равновеликими колёсами по схеме 4К46 и индивидуальным приводом, а получаемые тяговые характеристики являются идеализированными.

Установлены аналитические зависимости между агротехническими параметрами (диапазон балластировки, рабочая скорость, тяговое усилие) и требуемым диапазоном регулирования мощности (CPSR) тягового электродвигателя, обобщенные в виде безразмерного комплекса. Увеличение расчетной рабочей скорости с 4 до 8 км/ч при фиксированном коэффициенте диапазона эксплуатационных масс, равном 1,66, снижает требуемый CPSR с 11,1 до 5,5.

Обоснована стратегия унификации тяговых электродвигателей внутри модельного ряда, при которой один типоразмер электрической машины способен обеспечить требования всей серии за счет программного смещения базовой точки на внешней скоростной характеристике без пересчета электромагнитной системы.

Введение в методику коэффициента диапазона эксплуатационных масс и коэффициента возможной перегрузки позволяет перейти от дискретного задания двух масс (без балласта и с балластом) к непрерывному диапазону, что повышает точность

обоснования требований к электроприводу.

Полученная в результате расчета внешняя скоростная характеристика является завершённым техническим заданием для этапа проектирования тягового электродвигателя методом конечных элементов в специализированных CAE-пакетах.

Направления дальнейших исследований предполагают учет параметров накопителей энергии, экспериментальную верификацию методики, обоснование коэффициентов и структуры модельного ряда СМП на основе анализа существующих тракторов, введение безразмерных комплексов для оценки параметров привода, а также построение тяговых характеристик с учетом удельного расхода топлива и КПД трансмиссии в различных режимах.

Литература

1. Электронная система управления последовательного гибридного трактора с мотор-колесами / А. Ю. Измайлов, А. В. Букреев, Р. Ю. Соловьев [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2025. – Т. 19, № 4. – С. 4-12. – DOI 10.22314/2073-7599-2025-19-4-4-12. – EDN XYJQJR.
2. Актуальность разработки высокотехнологичных тракторов тяговых классов 0,6-2 / Р. Ю. Соловьев, С. В. Черанев, С. Б. Карякин [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 11(269). – С. 14-17. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-11-14-17. – EDN ZZDKSY.
3. Даненков, И. Д. Выбор типа электродвигателя для применения в качестве тягового на тракторной технике / И. Д. Даненков, Р. Р. Соловьев // Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств : Сборник научных трудов по материалам XIX Международной научно-технической конференции, Саратов, 11 апреля 2024 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 2024. – С. 191-198. – EDN GOYBNX.
4. Evaluation of energy-economic parameters of tractor with electrically driven power unit / A. V. Bizhaev, N. S. Devyanin, V. L. Chumakov [et al.] // E3S Web of Conferences : II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023), Tashkent, 13–15 сентября 2023 года. Vol. 443. – Tashkent: EDP Sciences, 2023. – P. 03004. – DOI 10.1051/e3sconf/202344303004. – EDN BMLATV
5. Развитие рынка высокоавтоматизированной сельскохозяйственной техники. Барьеры и пути их решения / Р. Ю. Соловьев, С. В. Черанев, А. В. Коломейченко [и др.] // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 2(30). – С. 27-34. – EDN QJVQCY.
6. Повышение эксплуатационной надежности транспортных средств сельскохозяйственного назначения с электромеханической трансмиссией / А. П. Споров // Аграрный научный журнал. – 2026. – № 1. – С. 118-126. – DOI 10.28983/asj.y2026i1pp118-126. – EDN GLCSZM.
7. Перспективы развития тракторостроения в России / О. Н. Дидманидзе, Е. П. Парлюк, Н. Н. Пуляев, М. М. Прокофьев // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 5(311). – С. 2-7. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-5-2-7. – EDN UKRERY.
8. Liu X. et al. A robust design of the model-free-adaptive-control-based energy management for plug-in hybrid electric vehicle // Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 20. – P. 7467.
9. Декарбонизация мобильных энергетических средств, используемых в сельскохозяйственном производстве / А. Ю. Измайлов, А. С. Дорохов, И. А. Старостин, А. В. Ещин // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 4-10. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-1-4-10. – EDN FWIYAM.
10. Kotal S. et al. Performance analysis of Electric Vehicles in terms of Constant Power Speed Range (CPSR) // American Journal of Advanced Computing (AJAC). – 2024. – Т. 2. – №. 4. – P. 12.
11. Geng L. et al. An Axial Split Phase Permanent Magnet Synchronous Motor With Wide Constant Power Speed Range and High Efficiency Range // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2024. – Т. 72. – №. 4. – Pp. 4019-4029.
12. Mocera F., Somà A. Analysis of a parallel hybrid electric tractor for agricultural applications // Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 12. – P. 3055.
13. Li Z. et al. Combined acceleration slip regulation for multi-wheel distributed electric drive vehicles considering torque loss factor // Control Engineering Practice. – 2024. – Т. 146. – P. 105893.
14. Обоснование выбора параметров электромеханической трансмиссии для

трактора тягового класса 0,6-0,9 и согласование тяговых характеристик / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев, Е. Н. Ильченко // *Агроинженерия*. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 63-70. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-1-63-70. – EDN LKJWSF.

15. Методика расчета емкости аккумуляторной батареи мобильного транспортного средства с электроприводом на основе Т16М / Л. Ю. Юферев, А. П. Споров // *Аграрный научный журнал*. – 2024. – № 3. – С. 131-139. – DOI 10.28983/asj.y2024i3pp131-139. – EDN QTCEEO.

16. Экспериментальные исследования МЭС тягового класса 0,6 с автономным электроприводом / З. А. Годжаев, С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев [и др.] // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2025. – Т. 20, № 4(80). – С. 85-92. – DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-85-92. – EDN GGOEXN

17. Методика определения параметров схемы замещения электромеханического модуля с повышенным электромагнитным моментом / А. Г. Городнов, В. Ю. Корнилов, Е. Ю. Федоров // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 185-197. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-185-197. – EDN ХКВСWQ.

18. Исследования по оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля / А. Н. Цветков, Н. Ш. Доан, Д. А. Ярославский // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 144-157. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157. – EDN USMMDW.

19. Применение динамического компенсатора искажений напряжения в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера / Д. В. Дзюин, Г. А. Скопин, А. Н. Комков, В. В. Дмитриева // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 49-62. – DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62. – EDN IREOEO.

20. Стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты / Р. Р. Гибадуллин, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 164-175. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-1-164-175. – EDN WZGQOI.

21. Тяговый расчет модульного энерготехнологического средства с учетом кинематического несоответствия привода ведущих осей / А. В. Лавров, В. А. Воронин, М. В. Сидоров, И. А. Пехальский // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2022. – Т. 16, № 2. – С. 30-36. – DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36. – EDN UQKYSF.

22. Синхронный реактивный двигатель без магнитов класса энергоэффективности IE5 / В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский, В. М. Казакбаев // *Электротехника*. – 2019. – № 6. – С. 40-46. – EDN PVKMID.

23. Расчет мощности двигателя и веса трактора тягово-энергетической концепции / Г. М. Кутьков, В. Н. Сидоров, М. В. Сидоров // *Электронный журнал: наука, техника и образование*. – 2016. – № 2(6). – С. 37-46. – EDN WPNCQL.

24. Renius K. T. *Fundamentals of Tractor Design*. Springer. Cham. 2020. 287 с. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32804-7>.

25. Балластирование как способ повышения эксплуатационных свойств трактора / Г. А. Иовлев, И. И. Голдина // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. – 2022. – Т. 69, № 1(46). – С. 44-54. – DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-1-44-54. – EDN ZVTFSG.

Авторы публикации

Соловьев Рудольф Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, заместитель директора по научно-технологическому развитию, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0001-7913-9408>. *Email*: rudsol@mail.ru.

Соловьев Роман Рудольфович – младший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0005-9934-2514>. *Email*: soll.rom@yandex.ru.

Букреев Алексей Валерьевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>. *Email*: vim@aleksey-bukreev.ru.

References

1. Electronic control system for a series hybrid tractor with in-wheel motors / A. Yu. Izmaylov, A. V. Bukreev, R. Yu. Solovyev [et al.] // *Agricultural Machinery and Technologies*. – 2025. – Vol. 19, No. 4. – P. 4-12. – DOI 10.22314/2073-7599-2025-19-4-4-12. – EDN XYJQJR.
2. Relevance of the Development of High-Tech Tractors of Traction Classes 0.6–2 / R. Yu. Solovyev, S. V. Cheranov, S. B. Karjakin [et al.] // *Techniques and Equipment for the Village*. – 2019. – No. 11(269). – P. 14-17. – DOI 10.33267/2072-9642-2019-11-14-17. – EDN ZZDKSY.
3. Choosing the type of electric motor for use as a traction motor on tractor equipment / I. D. Danenkov, R. R. Solovyev // *Current Issues in the Organization of Road Transport, Traffic Safety and Operation of Vehicles: Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the XIX International Scientific and Technical Conference*. – Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2024. – P. 191-198. – EDN GOYBNX.
4. Evaluation of Energy-Economic Parameters of Tractor with Electrically Driven Power Unit / A. V. Bizhaev, N. S. Devyanin, V. L. Chumakov [et al.] // *E3S Web of Conferences: II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023)*. – Vol. 443. – Tashkent: EDP Sciences, 2023. – P. 03004. – DOI 10.1051/e3sconf/202344303004. – EDN BMLATV.
5. Development of market of highly automated agricultural machinery. Barriers and their solutions / R. Yu. Solovyev, S. V. Cheranov, A. V. Kolomeychenko [et al.] // *Innovations in the Agro-Industrial Complex: Problems and Prospects*. – 2021. – No. 2(30). – P. 27-34. – EDN QJVQCY.
6. Improving the operational reliability of agricultural vehicles with electromechanical transmission / A. P. Sporov // *Agrarian Scientific Journal*. – 2026. – No. 1. – P. 118-126. – DOI 10.28983/asj.y2026i1pp118-126. – EDN GLCSZM.
7. Prospects for the development of tractor construction in Russia / O. N. Didmanidze, E. P. Parlyuk, N. N. Pulyaev, M. M. Prokofyev // *Techniques and Equipment for the Village*. – 2023. – No. 5(311). – P. 2-7. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-5-2-7. – EDN UKRERY.
8. Liu X. et al. A robust design of the model-free-adaptive-control-based energy management for plug-in hybrid electric vehicle // *Energies*. – 2022. – T. 15. – №. 20. – P. 7467.
9. Decarbonization of mobile energy vehicles used in agricultural production / A. Yu. Izmaylov, A. S. Dorokhov, I. A. Starostin, A. V. Eshchin // *Agricultural Engineering*. – 2024. – Vol. 26, No. 1. – P. 4-10. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-1-4-10. – EDN FWIYAM.
10. Kotal S. et al. Performance analysis of Electric Vehicles in terms of Constant Power Speed Range (CPSR) // *American Journal of Advanced Computing (AJAC)*. – 2024. – T. 2. – №. 4. – P. 12.
11. Geng L. et al. An Axial Split Phase Permanent Magnet Synchronous Motor With Wide Constant Power Speed Range and High Efficiency Range // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2024. – T. 72. – №. 4. – Pp. 4019-4029.
12. Mocera F., Somà A. Analysis of a parallel hybrid electric tractor for agricultural applications // *Energies*. – 2020. – T. 13. – №. 12. – P. 3055.
13. Li Z. et al. Combined acceleration slip regulation for multi-wheel distributed electric drive vehicles considering torque loss factor // *Control Engineering Practice*. – 2024. – T. 146. – P. 105893.
14. Justification of the parameters of an electromechanical transmission for a tractor of traction class of 0.6-0.9 traction class and coordination of traction characteristics / Z. A. Godzhaev, S. E. Senkevich, I. S. Alekseev, E. N. Ilchenko // *Agricultural Engineering*. – 2023. – Vol. 25, No. 1. – P. 63-70. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-1-63-70. – EDN LKJWSF.
15. Methodology of calculation of battery capacity of mobile vehicle with electric drive on the basis of t16m / L. Yu. Yuferev, A. P. Sporov // *Agrarian Scientific Journal*. – 2024. – No. 3. – P. 131-139. – DOI 10.28983/asj.y2024i3pp131-139. – EDN QTCEEO.
16. Experimental studies of mobile power vehicle of 0.6 traction class with an autonomous electric drive / Z. A. Godzhaev, S. E. Senkevich, I. S. Alekseev [et al.] // *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. – 2025. – Vol. 20, No. 4(80). – P. 85-92. – DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-4-85-92. – EDN GGOEXN.
17. Method for determining the parameters of a substitution scheme for an electromechanical module with an increased electromagnetic moment / A. G. Gorodnov, V. Yu. Kornilov, E. Yu. Fedorov // *News of higher educational institutions. Problems of energy*. – 2022. – Vol. 24, No. 3. – P. 185-197. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-185-197. – EDN XKBCWQ.
18. Research on optimization of vector control of an asynchronous motor using the analytical control system / A. N. Tsvetkov, N. Sh. Doan, D. A. Yaroslavsky // *News of higher*

educational institutions. Problems of energy. –2022. –Vol. 24, No. 3. –P. 144-157. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157. – EDN USMMDW.

19. Dynamic voltage restorer application in the multi-motor electric drive system of a belt conveyor / D. V. Dzyuin, G. A. Skopin, A. N. Komkov, V. V. Dmitrieva // News of higher educational institutions. Problems of energy. –2025. –Vol. 27, No. 2. –P. 49-62. – DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62. – EDN IREOEO.

20. A stand for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators / R. R. Gibadullin, M. F. Nizamiev, I. V. Ivshin [et al.] // News of higher educational institutions. Problems of energy. – 2022. –Vol. 24, No. 1. –P. 164-175. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-1-164-175. – EDN WZGQOI.

21. Traction calculation for modular energotechnological unit given kinematic mismatch of driving axles / A. V. Lavrov, V. A. Voronin, M. V. Sidorov, I. A. Pekhalsky // Agricultural Machinery and Technologies. –2022. –Vol. 16, No. 2. –P. 30-36. – DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-30-36. – EDN UQKYSF.

22. Energy efficiency class ie5 magnet-free synchronous reluctance motor / V. A. Prakht, V. A. Dmitrievskii, V. M. Kazakbaev // Russian Electrical Engineering. –2019. –No. 6. –P. 40-46. – EDN PBKMID.

23. Calculation of engine power and weight of a towing power concept tractor / G. M. Kutkov, V. N. Sidorov, M. V. Sidorov // Electronic Journal: Science, Technology and Education. – 2016. –No. 2(6). –P. 37-46. – EDN WPNCQL.

24. Fundamentals of Tractor Design / K. T. Renius // Springer. –Cham, 2020. –287 p. – DOI 10.1007/978-3-030-32804-7.

25. Ballasting as the way of improving the operational properties of the tractor / G. A. Iovlev, I. I. Goldina // Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro–Industrial Complex. –2022. –Vol. 69, No. 1(46). –P. 44-54. – DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-1-44-54. – EDN ZVTFSG.

Authors of the publication

Rudolf Yu. Solovyov – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7913-9408>. Email: rudsol@mail.ru.

Roman R. Solovyov –Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0005-9934-2514>. Email: soll.rom@yandex.ru.

Aleksey V. Bukreev –Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0209-1167>. Email: vim@aleksey-bukreev.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **17.02.2026 г.**

Отредактировано **01.04.2026 г.**

Принято **14.04.2026 г.**