

EDN: KFBGAD

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-21-29



Научная статья

УДК 629.3.014.5:621.313.13



## Разработка динамометрического стенда для комплексных испытаний мотор–колес

**Максим Анатольевич Прокопов**<sup>1,2</sup>,  
аспирант, ведущий советник отдела,  
e-mail: maprokov26@yandex.ru;  
**Сергей Николаевич Девянин**<sup>1</sup>,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: devta@rambler.ru;

**Андрей Юрьевич Кульчев**<sup>1,3</sup>,  
аспирант, научный сотрудник,  
e-mail: andreikulchev@yandex.ru;  
**Павел Иванович Бурак**<sup>2</sup>,  
доктор технических наук,  
заместитель директора департамента,  
e-mail: p.burak@mcx.gov.ru

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Министерство сельского хозяйства РФ, Москва, Российская Федерация;

<sup>3</sup>Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Развитие электрифицированного транспорта сдерживается отсутствием унифицированных методик и стендов для оценки характеристик мотор-колес в условиях, приближенных к реальным. Существенное ограничение аналогов – невозможность синхронной регистрации электрических и механических параметров при совместном действии вертикальной нагрузки и горизонтального тягового сопротивления. (*Цель исследования*) Разработка динамометрического стенда с комбинированной системой нагружения и методики комплексных испытаний. (*Материалы и методы*) Стенд включает раму в виде подвижной платформы с мотор-колесом и площадками для грузов, создающих вертикальную нагрузку, и платформу имитации нагрузки, создающую регулируемое тяговое сопротивление. Задняя часть через силоизмерительный узел гибко соединена с платформой имитации нагрузки. Микроконтроллерный блок синхронно регистрирует силу тока, напряжение, частоту вращения, температуру и время. (*Результаты и обсуждение*) Испытания проведены на асфальтобетоне при нагрузке на колесо 300 ньютонов, базе модуля 0,6 метра, радиусе колеса 0,125 метра, начальном показании вертикального динамометра 50 ньютонов, коэффициентах сопротивления качению 0,02 и сцепления 0,7. Варьировали нагрузку на платформу (50-400 ньютонов), мощность (50-600 ватт). Выведены кинематические зависимости. При нагрузке 100 ньютонов и мощности 50-350 ватт касательная сила составила 58,7 ньютона, тяговое усилие – 52,7 ньютона, показание вертикального датчика – 37,8 ньютона, сопротивление качению – 6,0 ньютонов, крутящий момент – 7,3 ньютона на метр. При 350 ньютонах касательная сила возросла до 192 ньютонов, тяговое усилие – до 186 ньютонов, вертикальное уменьшилось до 10 ньютонов, сопротивление качению – 6,0 ньютонов, момент – 24 ньютонов на метр. Момент изменялся за счет нагрузки платформы и почти не зависел от мощности. При нагрузке выше 384 ньютона зафиксировано буксование. (*Выводы*) Стенд позволяет синхронно получать временные зависимости электрических и механических параметров для оценки коэффициента полезного действия мотор-колеса, определения сопротивления качению, валидации математических моделей и обоснования алгоритмов управления тяговым электроприводом в диапазоне эксплуатационных нагрузок.

**Ключевые слова:** мотор-колесо, динамометрический стенд, комбинированное нагружение, тягово-энергетические характеристики, синхронная регистрация, сопротивление качению, крутящий момент, электропривод.

■ **Для цитирования:** Прокопов М.А., Девянин С.Н., Кульчев А.Ю., Бурак П.И. Разработка динамометрического стенда для комплексных испытаний мотор-колес // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 21-29. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-21-29. EDN: KFBGAD.

Scientific article

## Development of a Dynamometric Test Stand for Comprehensive Motor–Wheel Assembly Testing

**Maxim A. Prokopov**<sup>1,2</sup>,  
graduate student, lead advisor,  
e-mail: maprokov26@yandex.ru;

**Sergei N. Devyanin**<sup>1</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), professor,  
e-mail: devta@rambler.ru;

**Andrei Yu. Kulchev**<sup>1,3</sup>,  
graduate student, researcher,  
e-mail: andreikulchev@yandex.ru;

**Pavel I. Burak**<sup>2</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), deputy director of department,  
e-mail: pi.burak@mcx.gov.ru

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Moscow;

<sup>3</sup>Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The development of electrified transport is constrained by the lack of unified methods and test stands for evaluating the characteristics of motor-wheel assemblies under conditions close to real operation. A significant limitation of existing analogues is their inability to synchronously record electrical and mechanical parameters under the combined effect of vertical load and horizontal tractive resistance. (*Research purpose*) The study aimed to develop a dynamometric test stand with a combined loading system and a methodology for comprehensive testing. (*Materials and methods*) The test stand consists of a frame designed as a movable platform equipped with a motor-wheel assembly and weight platforms used to apply a vertical load, as well as a load simulation platform that generates adjustable tractive resistance. The rear section of the movable platform is flexibly connected to the load simulation platform through a force-measuring unit. A microcontroller unit synchronously records current, voltage, rotational speed, temperature, and time. (*Results and discussion*) Tests were carried out on asphalt concrete at a wheel load of 300 newtons, a module base length of 0.6 meters, a wheel radius of 0.125 meters, an initial vertical dynamometer reading of 50 newtons, a rolling resistance coefficient of 0.02, and an adhesion coefficient of 0.7. The platform load was varied from 50 to 400 newtons, and the power input from 50 to 600 watts. Kinematic relationships were derived. At a platform load of 100 newtons and a power range of 50–350 watts, the tangential force was 58.7 newtons, the tractive force was 52.7 newtons, the vertical sensor reading was 37.8 newtons, the rolling resistance was 6.0 newtons, and the torque was 7.3 newton-meters. At a platform load of 350 newtons, the tangential force increased to 192 newtons, the tractive force to 186 newtons, while the vertical force decreased to 10 newtons, the rolling resistance remained 6.0 newtons, and the torque reached 24 newton-meters. The torque varied with the platform load and was almost independent of the power input. Slippage was recorded at loads above 384 newtons. (*Conclusions*) The test stand enables synchronous acquisition of time-dependent electrical and mechanical parameters for evaluating the efficiency of a motor-wheel assembly, determining rolling resistance, validating mathematical models, and substantiating control algorithms for traction electric drives over the operating load range.

**Keywords:** motor-wheel assembly, dynamometric test stand, combined loading, traction and energy characteristics, synchronous recording, rolling resistance, torque, electric drive.

■ **For citation:** Prokopov M.A., Devyanin S.N., Kulchev A.Yu., Burak P.I. Development of a dynamometric test stand for comprehensive motor-wheel assembly testing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 21-29 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-21-29. EDN: KFBGAD.

Развитие транспорта и самоходных машин характеризуется трендом на электрификацию и декарбонизацию [1]. В современном мире традиционные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) постепенно вытесняются тяговыми электродвигателями [2], обеспечивающими лучшие экологические характеристики и возможности оперативного управления. Требования к снижению выбросов углекислого газа, повышению топливной эффективности и улучшению экологических факторов стимулируют переход на электродвигатели и гибридные системы [3]. Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге находится на этапе постепенного перехода от опытных образцов (макетов) к мелкосерийному производству [4]. К наиболее перспективным направлениям относится внедрение мотор-колес, представляющих собой бесщеточный синхронный двигатель, встроенный непосредственно в ступицу колеса [5].

Неоспоримое преимущество мотор-колеса состоит в возможности индивидуального привода для многоосных машин. Однако его широкому внедрению препятствует ряд ограничений: адаптивные алгоритмы управления, эффективное отведение тепла от электродвигателя, ресурс аккумуляторных батарей, отсутствие серийного производства, отсутствие стандартизации продукции [6], довольно низкий уровень развития инфраструктуры, особенно для интегральных решений типа мотор-колесо [7]. Также существуют научно-технические проблемы, наиболее актуальная из них заключается в отсутствии унифицированных методик и оборудования для комплексных испытаний мотор-колес в условиях, приближенных к реальной эксплуатации [8].

Отсутствие испытательных стендов, позволяющих воспроизвести реальные тягово-сцепные свойства [9], – одна из главных причин возникновения существенных расхождений между расчетными и

реальными энергетическими затратами при эксплуатации тракторов с электрической тягой [10], а значительная доля неисправностей связана именно с некорректным моделированием внешних нагрузок [11].

Кроме того, выбор режимов испытания электродвигателей в лабораторных условиях должен базироваться на данных о реальных нагрузочных циклах, в противном случае результаты испытаний не могут быть экстраполированы на натурную эксплуатацию [12].

**Цель исследования:** разработка стенда, позволяющего моделировать комплексные эксплуатационные нагрузки на мотор-колесо и осуществлять синхронную фиксацию его основных параметров для определения эффективных режимов работы.

**Материалы и методы.** Проведен обзор и сравнительный анализ стендов для испытаний колес и электродвигателей (Патенты RU 2838715, 180157, 2793016, 2778737) по следующим критериям: возможность создания комбинированного нагружения (вертикальная и горизонтальная составляющие), наличие синхронной регистрации электрических и механических параметров, возможность испытаний на деформируемых опорных поверхностях. Анализ выполнен с учетом общих принципов построения динамометрических стендов, математического моделирования испытательного оборудования [13], а также результатов исследований энергоэффективности самоходных машин [14].

В результате анализа выявлен общий недостаток существующих аналогов – невозможность моделирования совместного воздействия вертикальной нагрузки и горизонтального тягового сопротивления при качении по реальным деформируемым поверхностям с одновременным контролем электрических характеристик тягового электродвигателя, силовых параметров тяги и сопротивлений. Наиболее близким по совокупности существенных признаков является стенд для испытаний колес и подвесок мобильных роботов (Патент RU 2778737), содержащий поворотную раму, устройство для имитации веса, конвейерную ленту с грунтозацепами и канал, заполненный грунтом. Недостаток прототипа – отсутствие системы для создания и измерения регулируемого горизонтального тягового сопротивления, имитирующего работу с сельскохозяйственным орудием, и недостаточность измерительного комплекса для синхронного контроля электрических и механических параметров.

На основе анализа эксплуатационных режимов мотор-колес сформулированы требования к синхронной регистрации параметров. Определен перечень регистрируемых величин: электрические – сила тока и напряжение; механические – частота вращения, крутящий момент, тяговое усилие. Ана-

лиз схемотехники тяговых электроприводов [15] подтверждает необходимость синхронной регистрации указанных выше величин. Установлено, что в большинстве известных аналогов не предусмотрена возможность синхронной регистрации указанных параметров в единой системе сбора данных [16].

Для определения требуемых диапазонов вертикальных и горизонтальных нагрузок, воспроизводимых стендом, использован аналитический метод на основе уравнений тягового баланса мотор-колеса, а также учтены зависимости энергопотребления от характеристик двигателя [17] и опубликованные результаты моделирования работы электрического трактора в составе агрегата [18].

**Результаты и обсуждение.** Технической проблемой, на решение которой направлено изобретение, является необходимость создания стенда, используемого для моделирования комплексных эксплуатационных нагрузок на мотор-колесо и синхронной фиксации его основных рабочих параметров в лабораторно-полевых условиях [19]. Технический результат изобретения: расширение функциональных возможностей стенда за счет обеспечения независимого дозированного создания вертикальной и горизонтальной нагрузок при качении дифференцируемым поверхностям и комплексного контроля механических и электрических параметров.

Оригинальное техническое решение в виде конструкции стенда для комплексных испытаний мотор-колес представлено на *рисунке 1*.

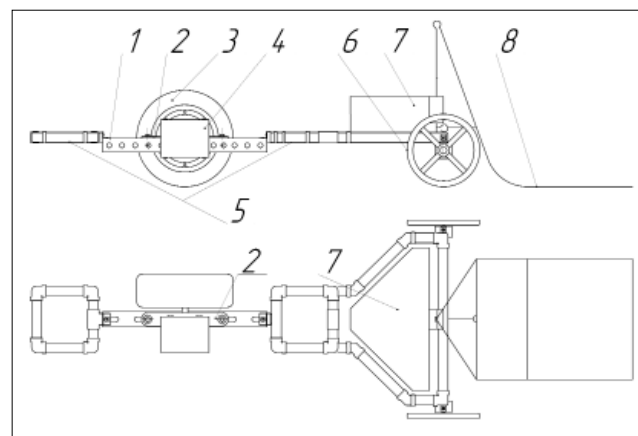


Рис. 1. Общий вид стенда для комплексных испытаний мотор-колес с комбинированной системой нагружения (Патент RU 2026109012)

Fig. 1. General view of the combined-loading test stand for comprehensive testing of motor-wheel assemblies (Patent RU 2026109012)

Стенд изготовлен в виде двух разборных модулей.

Первый модуль представляет собой подвижную платформу 1, в передней части которой смонтировано крепление 2 для установки испытуемого мо-

тор-колеса 3 с возможностью вращения. Измерительный блок 4 выполнен на базе программируемого вычислителя (микроконтроллера или персонального компьютера) с устройством сбора данных и средством визуализации. В составе блока – средства измерения времени ( $t$ , с), частоты вращения мотор-колеса ( $n$ , мин<sup>-1</sup>), температуры электродвигателя ( $t$ , °С), силы тока ( $I$ , А) и напряжения ( $U$ , В) в цепи. По обе стороны мотор-колеса симметрично закреплены горизонтальные площадки 5 для съемных грузов, создающих дозированную вертикальную нагрузку. В задней части платформа дополнительно снабжена вспомогательными опорными элементами (колесами-роликами) 6, обеспечивающими устойчивость при нагружении, и через силоизмерительный узел 7 гибко соединена со вторым модулем – платформой имитации нагрузки 8. Силоизмерительный узел 7 включает как минимум один датчик силы для измерения горизонтальной ( $P_{\Gamma}$ , Н) и вертикальной ( $P_{\text{В}}$ , Н) составляющих [20]. Платформа имитации нагрузки 8 взаимодействует с опорной поверхностью и предназначена для создания регулируемого горизонтального тягового сопротивления, аналогичного соединению с рабочим органом (например, ковшем или волокушей).

Отличительные признаки, обеспечивающие новый технический результат:

- наличие на одной подвижной платформе двух независимых систем нагружения – вертикальной (через грузовые площадки) и горизонтальной (через платформу имитации нагрузки), что позволяет точно моделировать реальные условия работы мотор-колеса, например, колеса трактора, на которое действует вес агрегата и сопротивление почвы;
- комплексный измерительный блок, объединяющий средства контроля механических и электрических параметров, а также термометр для контроля температуры электродвигателя;
- силоизмерительный узел с двумя датчиками силы, ориентированными на измерение горизонтальной и вертикальной составляющих реакции рабочего органа, что обеспечивает возможность расчета крутящего момента мотор-колеса.

Предлагаемая архитектура обеспечивает синхронную регистрацию всех измеряемых параметров, возможность гибкой настройки системы, алгоритмов обработки данных и сохранение результатов испытаний для последующего анализа.

Конструкция стенда позволила реализовать следующую методику испытаний мотор-колес. Испытуемое мотор-колесо закрепляется в передней части подвижной платформы. На горизонтальные площадки и платформу имитации нагрузки размещаются грузы, масса которых соответствует требуемой вертикальной нагрузке. Стенд находится на опорной поверхности, соответствующей ти-

пу грунта или дорожного покрытия, подлежащего моделированию. Уровень вертикальной и горизонтальной нагрузок определяется планом испытаний.

Мотор-колесо приводится во вращение задаваемым током питания, а система нагружения создает заданное горизонтальное тяговое сопротивление. Силоизмерительный узел 7 регистрирует горизонтальную и вертикальную составляющие силы, действующей на подвижную платформу. Одновременно измерительный блок фиксирует механические, электрические параметры, температуру элементов конструкции и время.

Программируемое устройство осуществляет сбор данных со средств измерения, их обработку и отображение на средстве визуализации.

По завершении испытаний формируется протокол, содержащий временные зависимости всех регистрируемых параметров, а также рассчитанные тягово-энергетические характеристики.

Кинематическая схема процесса измерения изображена на рисунке 2. Максимальная сила тяги, которую может реализовать мотор-колесо без пробуксовки, определяется коэффициентом сцепления и вертикальной нагрузкой на колесо.

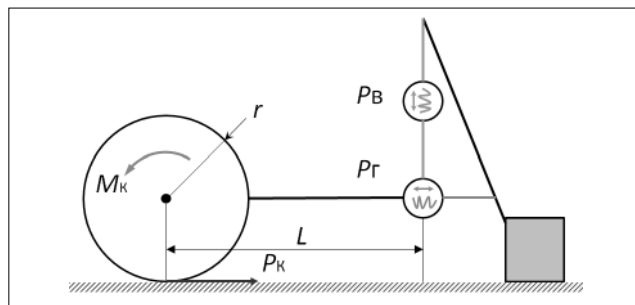


Рис. 2. Кинематическая схема процесса измерения:  $M_K$  – крутящий момент;  $P_{\Gamma}$  – тяговое усилие;  $P_{\text{В}}$  – сила вертикальной реакции;  $r$  – радиус мотор колеса;  $L$  – постоянное плечо стэнда;  $P_K$  – касательная сила сопротивления

Fig. 2. Kinematic diagram of the measurement process:  $M_K$  – torque;  $P_{\Gamma}$  – traction force;  $P_{\text{В}}$  – vertical reaction force;  $r$  – motor-wheel radius;  $L$  – fixed lever arm of the test stand;  $P_K$  – tangential resistance force

В установленном режиме динамометр, измеряющий тяговое усилие ( $P_{\Gamma}$ , Н), показывает отношение приложенного момента ( $M_K$ , Н·м) к радиусу мотор-колеса ( $r$ , м) за вычетом силы сопротивления качению ( $P_f$ , Н):

$$\frac{M_K}{r} = P_K = P_{\Gamma} + P_f. \quad (1)$$

Крутящий момент стремится перевернуть основную платформу, создавая вертикальную реакцию на плече ( $L$ , м), что изменяет силу вертикального динамометра ( $P_{\text{В}}$ , Н) на величину  $\Delta P_{\text{В}}$ . Таким образом, крутящий момент определяется произведением вертикальной реакции на постоянное плечо

чо стенда (основную платформу) и характеризуется следующей формулой:

$$M_k = \Delta P_B \cdot L. \quad (2)$$

Принимая во внимание связь крутящего момента с тяговым усилием через динамический радиус мотор-колеса ( $r$ ), получаем:

$$\Delta P_B \cdot L = M_k = \frac{M_k}{r} \cdot r = (P_T + P_f) \cdot r,$$

$$\frac{\Delta P_B}{(P_T + P_f)} = \frac{r}{L}. \quad (3)$$

Данное соотношение сил является практически постоянным и показывает, что результаты измерений динамометров определяются исключительно геометрическими параметрами стенда и силой сопротивления качению.

Сила сопротивления качению может быть определена по результатам измерений с использованием выражения (3) по зависимости:

$$P_f = \frac{L}{r} \cdot \Delta P_B - P_T. \quad (4)$$

Измеряемые силы будут варьироваться в зависимости от условий испытаний мотор-колеса на стенде: мощности, подведенной к колесу, величины установленного груза на платформе, вида опорной поверхности и др.

Для оценки результатов измерений в процессе экспериментов проведены расчетные исследования характеристик мотор-колеса: максимальная частота вращения – 2000 мин<sup>-1</sup>; максимальный крутящий момент – 57 Н·м; радиус мотор-колеса – 0,125 м; диаметр оси – 16 мм; масса – 3,6 кг.

Исследования проводились для движения по асфальтобетонной поверхности с коэффициентом сопротивления качению  $f = 0,02$  и коэффициентом сцепления колеса с опорной поверхностью  $\varphi_k = 0,7$ . Изменение сопротивления платформы нагружения обеспечивалось за счет съемных грузов от 50 до 400 Н при коэффициенте сопротивления движению платформы  $\varphi_c = 0,6$ . Показания вертикального датчика в положении покоя, когда мотор-колесо не нагружено моментом:  $P_{B0} = 50$  Н. База модуля 1 составляла  $L = 0,6$  м. Весовая нагрузка на мотор-колесо (модуль 1) принималась постоянной:  $G_k = 300$  Н. Подводимая мощность к мотор-колесу изменялась в диапазоне от 50 до 600 Вт.

На рисунке 3 представлены результаты влияния подводимой к мотор-колесу мощности ( $N_k$ ) при нагружении платформы весом  $G_c = 100$  Н.

При увеличении подводимой к мотор-колесу мощности от 50 до 350 Вт значения действующих сил оставались постоянными: касательная сила мотор-колеса  $P_k = 58,7$  Н, показания датчика тяги (горизонтального)  $P_T = 52,7$  Н, вертикального датчика  $P_B = 37,8$  Н, сопротивление качению мотор-колеса

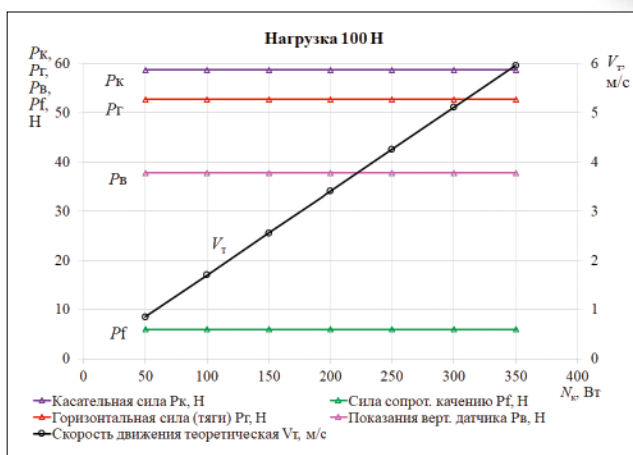


Рис. 3. Влияние подводимой к мотор-колесу мощности на действующие силы и скорость движения при нагружении платформы весом 100 Н

Fig. 3. Effect of input power supplied to the motor-wheel assembly on the acting forces and travel speed under a platform load of 100 N

$P_f = 6,0$  Н. Изменение подводимой мощности приводит к увеличению теоретической скорости движения ( $V_T$ ) от 0,85 до 5,96 м/с.

Изменение мощностей на привод для движения платформы  $N_{кр}$  (модуль 2), на преодоление сопротивления качению мотор-колеса  $N_f$ , крутящего момента на мотор-колесе ( $M_k$ , Н·м) и угловой частоты вращения колеса ( $\omega_k$ , с<sup>-1</sup>) показано на рисунке 4.

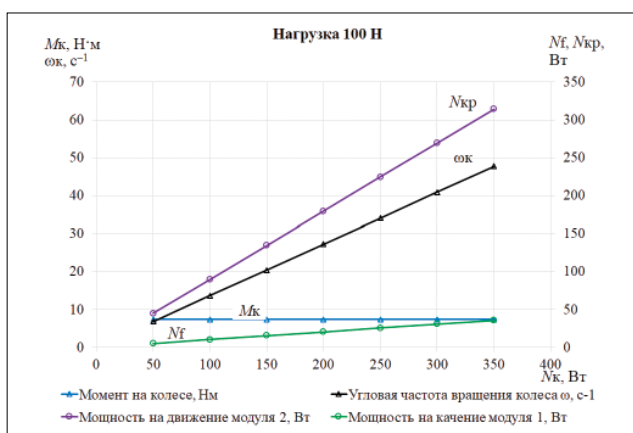


Рис. 4. Влияние подводимой к мотор-колесу мощности на привод для движения платформы и на преодоление сопротивления качению мотор-колеса при нагружении платформы весом 100 Н

Fig. 4. Effect of input power supplied to the motor-wheel assembly on the power required to drive the platform and the power required to overcome motor-wheel rolling resistance under a platform load of 100 N

Приведенные результаты показывают, что при увеличении подводимой к мотор-колесу мощности от 50 до 350 Вт величина крутящего момента на мотор-колесе сохраняет постоянное значение:  $M_k = 7,3$  Н·м.

Угловая частота вращения мотор-колеса ( $\omega_k$ ) увеличивается с 6,8 до 47,7  $\text{с}^{-1}$ , что приводит к повышению скорости движения и росту мощностей сопротивления качению ( $N_f$ ) с 5,1 до 35,8 Вт и на движение платформы ( $N_{кр}$ ) с 44,9 до 314,2 Вт.

Исследовано влияние подводимой к мотор-колесу мощности  $N_k$  при нагружении платформы весом  $G_c = 350$  Н (рис. 5). При увеличении подводимой к мотор-колесу мощности от 50 до 600 Вт величины действующих сил, также как и при нагружении платформы весом 100 Н, сохраняют постоянные значения.

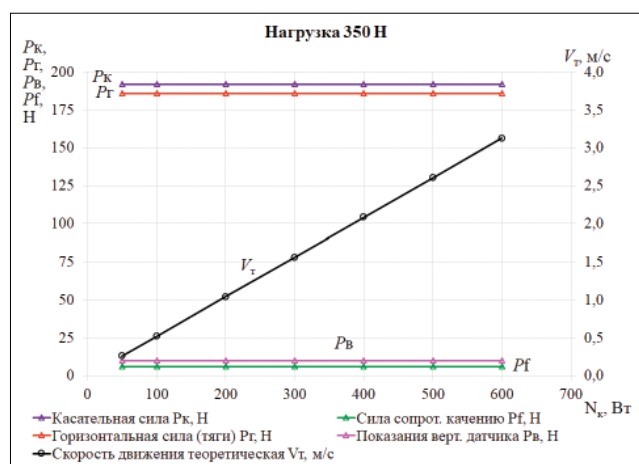


Рис. 5. Влияние подводимой к мотор-колесу мощности на действующие силы и скорость движения при нагружении платформы весом 350 Н

Fig. 5. Effect of input power supplied to the motor-wheel assembly on the acting forces and travel speed under a platform load of 350 N

Касательная сила мотор-колеса увеличилась до  $P_k = 192$  Н, показания датчика тяги (горизонтального) увеличились до  $P_r = 186$  Н, вертикального датчика уменьшились до  $P_v = 10$  Н, сопротивление качению мотор-колеса сохранилось:  $P_f = 6,0$  Н. Изменение подводимой мощности приводит к росту теоретической скорости движения ( $V_t$ ) с 0,26 до 3,13 м/с.

Изменение мощностей на привод в движение модуля 2 ( $N_{кр}$ ) и на преодоление сопротивления качению мотор-колеса ( $N_f$ ) крутящего момента на мотор-колесе ( $M_k$ ) и угловой частоты вращения колеса ( $\omega_k$ ) показано на рисунке 6. При увеличении подводимой к мотор-колесу мощности от 50 до 600 Вт величина крутящего момента на мотор-колесе также сохраняет постоянное значение, которое увеличилось до 24 Н·м.

Угловая частота вращения мотор-колеса ( $\omega_k$ ) увеличивается с 2,08 до 25,0  $\text{с}^{-1}$ , что приводит к увеличению скорости движения и росту мощностей сопротивления качению ( $N_f$ ) с 1,6 до 18,8 Вт и на движение платформы ( $N_{кр}$ ) с 48,4 до 581,2 Вт.

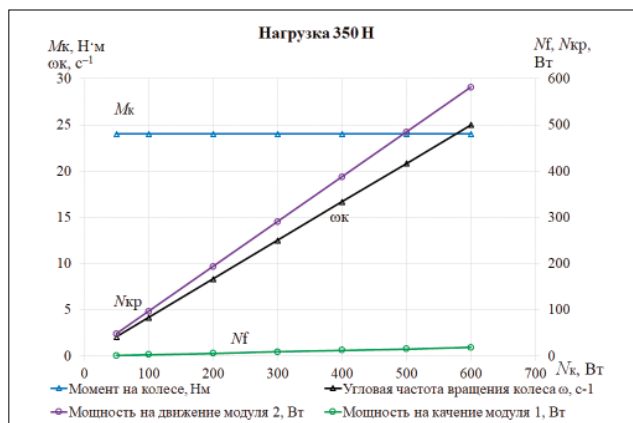


Рис. 6. Влияние подводимой к мотор-колесу мощности на привод для движения платформы и на преодоление сопротивления качению мотор-колеса при нагружении платформы весом 350 Н

Fig. 6. Effect of input power supplied to the motor-wheel assembly on the power required to drive the platform and overcome motor-wheel rolling resistance under a platform load of 350 N

Степень влияния весовой нагрузки платформы ( $G_c$ ) исследовалось при постоянной подводимой к мотор-колесу мощности  $N_k = 300$  Вт на силовые и мощностные характеристики мотор-колеса. На рисунке 7 представлены результаты исследований при изменении нагружения платформы весом ( $G_c$ ) от 50 до 400 Н. При увеличении весовой нагрузки ( $G_c$ ) от 50 до 384 Н касательная сила мотор-колеса ( $P_k$ ) монотонно увеличивается с 32 до 210 Н, показания датчика тяги ( $P_r$ ) синхронно с силой сопротивления движения платформы ( $P_{кр}$ ) увеличиваются с 26 до 204 Н.

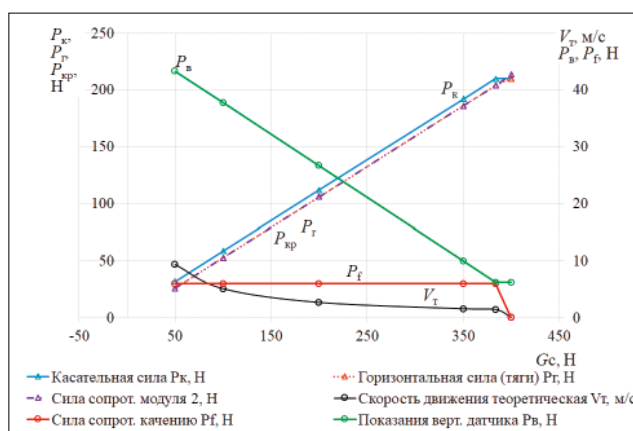


Рис. 7. Влияние весовой нагрузки платформы на действующие силы и скорость движения при подводимой к мотор-колесу мощности 300 Вт

Fig. 7. Effect of platform load on the acting forces and travel speed at an input power of 300 W supplied to the motor-wheel assembly

Показания вертикального датчика ( $P_v$ ) уменьшаются с 43,3 до 6,3 Н, а сопротивление качению

мотор-колеса ( $P_f$ ) сохраняется на уровне 6,0 Н. Повышение сопротивления движению приводит к гиперболическому снижению теоретической скорости движения ( $V_T$ ) с 9,4 до 1,4 м/с.

При весовой нагрузке платформы  $G_c > 384$  Н происходит скольжение мотор-колеса по опорной поверхности, что приводит к прекращению роста касательной силы ( $P_c$ ) и снижению силы ( $P_v$ ). Сила сопротивления движения платформы ( $P_{кр}$ ) становится больше силы тяги ( $P_T$ ) и качение мотор-колеса прекращается:  $V_T = 0$  м/с. Сила сопротивления качению падает до нуля, что приводит к некоторому увеличению показания датчика тяги ( $P_T$ ) до 210 Н.

Изменение характеристик мотор-колеса при изменении весовой нагрузки платформы показано на рисунке 8. С увеличением весовой нагрузки ( $G_c$ ) от 50 до 384 Н величина крутящего момента на мотор-колесе ( $M_k$ ) монотонно растет с 4 до 26,3 Н·м. Угловая частота вращения мотор-колеса ( $\omega_k$ ) снижается с 75 до 11,4 с<sup>-1</sup>, что приводит к снижению скорости движения и мощности сопротивления качению ( $N_f$ ) от 56,3 до 8,6 Вт. Мощность на движение платформы ( $N_{кр}$ ) увеличивается с 243,8 до 291,4 Вт, причем темп роста постепенно снижается.

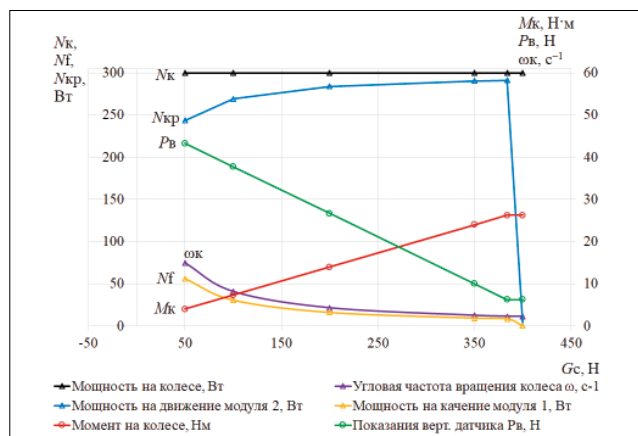


Рис. 8. Влияние весовой нагрузки платформы на характеристики мотор-колеса при подводимой к нему мощности 300 Вт

Fig. 8. The influence of the weight load of the platform on the characteristics of the motorized wheel with a power supply of 300 watts

При весовой нагрузке платформы  $G_c > 384$  Н мощность на движение платформы ( $N_{кр}$ ) и мощность сопротивления качению ( $N_f$ ) падают до нуля из-за прекращения движения, а крутящий момент на мотор-колесе ( $M_k$ ), показания вертикального датчика ( $P_v$ ) и угловая частота вращения колеса ( $\omega_k$ ) остаются на уровне значений, как при весовой нагрузке  $G_c = 384$  Н.

Результаты исследований показали возможность изменения режима работы мотор-колеса на указан-

ном динамометрическом стенде изменением подводимой к колесу мощности и величиной весовой нагрузки на платформе. Превышение весовой нагрузки сверх критической величины, приводящей к силе сопротивления платформы более высокой сцепной силы колеса с опорной поверхностью, приводит к остановке стенда.

Крутящий момент, создаваемый мотор-колесом, в основном изменяется за счет весовой нагрузки платформы и практически не зависит от подводимой к мотор-колесу мощности. А изменение подводимой мощности приводит в основном к изменению скорости движения. Если подводимая к колесу мощность меньше необходимой на преодоление сопротивления качению колеса и передвижение платформы, то стенд останавливается.

В процессе испытаний необходимо обеспечивать начальное значение вертикальной нагрузки  $P_{в0} > M_{kmax}/L$ , т.е. распределить весовую нагрузку на модуле 1 таким образом, чтобы в процессе испытаний на режимах, близких к максимальному значению крутящего момента, не снизить значения силы  $P_v$  до нуля.

Проведенные исследования подтвердили работоспособность стенда, возможность изменения режима (крутящего момента, тягового усилия и скорости движения) испытуемого мотор-колеса, а также продемонстрировали его способность обеспечивать моделирование совместного действия вертикальной и горизонтальной нагрузок. Синхронная регистрация механических и электрических параметров позволяет оценивать не только механическую, но и электрическую эффективность испытуемого мотор-колеса.

**Выводы.** Применение предложенного стенда для испытаний на деформируемых грунтах (почвогрунтах сельскохозяйственного фона) позволяет получать тягово-энергетические характеристики мотор-колеса с учетом реального взаимодействия шины с почвой (буксование, сдвиг), что корректно для выбора режимов работы электропривода самоходной сельскохозяйственной техники при выполнении полевых операций (вспашка, культивация, транспортные работы).

Показана возможность изменения крутящего момента колеса и скорости движения за счет изменяемой весовой нагрузки и подводимой к колесу мощности. Весовые нагрузки модуля 1 и модуля 2 стенда должны быть согласованы между собой в процессе изменения режимов испытаний.

Выведенные в результате анализа зависимости дают возможность определять крутящий момент при изменении тягового усилия и скорости движения мотор-колеса на различных видах опорной поверхности, сопротивление качению колеса, а также оценивать адекватность и корректность получаемых опытных данных.

Полученные в ходе испытаний временные зависимости электрических и механических параметров могут служить основой для оценки коэффициента полезного действия мотор-колеса, валидации математических мо-

делей движения тракторного агрегата, а также использованы для обоснования алгоритмов управления тяговым электроприводом в диапазоне эксплуатационных нагрузок на различных типах опорных поверхностей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Девянин С.Н., Марков В.А., Савастенко А.А., Савастенко Э.А. Проблемы электрификации автомобильного транспорта России // *Двигателестроение*. 2022. N1(287). С. 21-31. EDN: UTDHTO.
2. Окунев Г.А., Шепелев С.Д., Кузнецов Н.А. Тенденции переоснащения парка тракторов // *Сельский механизатор*. 2025. N4. С. 6-8. DOI: 10.47336/0131-7393-2025-4-6-7-8.
3. 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.
4. Ценч Ю.С., Шаров В.В. Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N3. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13.
5. Прокопов М.А., Кульчев А.Ю. Применение бесколлекторных двигателей в гидротехнике и мелиорации // *Сельский механизатор*. 2025. N6. С. 40-41. DOI: 10.47336/0131-7393-2025-6-40-41.
6. Бижаев А.В., Ветрова С.М., Барчукова А.С., Кривых Н.С. Использование индивидуального привода колес трактора посредством электрической тяги // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 78-85. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-78-85.
7. Drexler D., Kampker A., Born H. et al. Advances in electric motors: a review and benchmarking of product design and manufacturing technologies. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2025. Vol. 142. N5. 312-345. DOI: 10.1007/s00502-025-01331-3.
8. Бяков К.Е., Иваненков В.В., Холоденко В.Б., Чудаков О.И. Обзор конструкций современных динамометрических стендов для испытаний колесных транспортных средств // *Транспортные системы*. 2021. N4(22). С. 4-15. DOI: 10.46960/62045\_2021\_4\_4.
9. Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 33-42. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.
10. Plizga K. Analysis of energy consumption by electric agricultural tractor model under operating conditions. *Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 25. N1. 1-12. DOI: 10.2478/agriceng-2021-0001.
11. Бурак П.И., Голубев И.Г., Шахов В.А. Анализ отказов электрооборудования и электронных блоков управления сельскохозяйственной техники при испытаниях // *Техника и оборудование для села*. 2025. N10(340). С. 40-42. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-10-40-42.
12. Лобов Н.В., Афанасьев В.В. Выбор режимов испытания электродвигателей электроавтомобиля в лабораторных условиях // *Мир транспорта и технологических машин*. 2024. N4-3(87). С. 62-67. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-3(87)-62-67.
13. Горобцов А.С., Ляшенко М.В., Соколов-Добрев Н.С. и др. Математическая модель испытательного стенда // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. 2016. N4(16). С. 16-21. EDN: WMTNZD.
14. Jasper S.P., Mendonça W.S.De., Jung E.A. et al. Energy efficiency of four-wheel drive tractor in sowing operation. *Ciencia Rural*. 2025. Vol. 55. N1. DOI: 10.1590/0103-8478cr20240141.
15. Флоренцев С.Н., Уваров А.А., Байда С.В., Журов И.О. Схемотехника, конструкции преобразователей и алгоритмы управления тяговыми электроприводами // *Электротехника*. 2025. N6. С. 36-46. DOI: 10.53891/00135860-2025-6-36-46.
16. Воробьев А.Р., Федоров В.Б. Методика контроля характеристик измерительного оборудования для испытания двигательных установок // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2024. N1. С. 187-191. EDN: NXUVSU.
17. Kwon D., Ahn D.V., Kim J.G., Park Y.J. Effect analysis of motor power characteristics on the energy consumption of dual motor driven powertrain for electric tractor. *Journal of Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 49. N4. 465-475. DOI: 10.1007/s42853-024-00245-w.
18. Baek S.Y., Jeon H.H., Kim W.S. et al. Simulation analysis of motor and battery characteristics using a validated model of an electric tractor. *Electronics*. 2025. Vol. 14. N24. 4872. DOI: 10.3390/electronics14244872.
19. Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Майстренко Н.А. и др. Лабораторные исследования МЭС сельскохозяйственного назначения с автономным электроприводом тягового класса 0,6 // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27. N4. С. 15-24. DOI: 10.26897/2687-1149-2025-4-15-24.
20. Пархоменко С.Г., Пархоменко Г.Г. Измерение силы тяги на крюке трактора в агрегате с навесной сельскохозяйственной машиной // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N4. С. 15-19. DOI: 10.17816/0321-4443-66128.

### REFERENCES

1. Devyanin S.N., Markov V.A., Savastenko A.A., Savastenko E.A. Problems of electrification of motor transport in Russia. *Engines Construction*. 2022. N1(287). 21-31 (In Russian). EDN: UTDHTO.
2. Okunev G.A., Shepelev S.D., Kuznetsov N.A. Tractor fleet retooling trends. *Selskiy Mehanizator*. 2025. N4. 6-8 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2025-4-6-7-8.
3. Lachuga Yu.F., Izmajlov A.Yu., Lobachevskij Ya.P. Prior-

- ity 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.
4. Tsench Yu.S., Sharov V.V. Advancement of domestic mobile agricultural machinery powered by electric traction. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N3. 4-13 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13.
  5. Prokopov M.A., Kulchev A.Yu. Use of brushless engines in hydraulic engineering and reclamation. *Selskiy Mehanizator*. 2025. N6. 40-41 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2025-6-40-41.
  6. Bizhaev A.V., Vetrova S.M., Barchukova A.S., Krivykh N.S. Using individual tractor wheel drive through electric traction. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 78-85 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-78-85.
  7. Drexler D., Kampker A., Born H., et al. Advances in electric motors: a review and benchmarking of product design and manufacturing technologies. *Electrical Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 142. N5. 312-345 (In English). DOI: 10.1007/s00502-025-01331-3.
  8. Byakov K.Ye., Ivanenkov V.V., Kholodenko V.B., Chudakov O.I. Review of designs of modern dynamometer stands for testing wheeled vehicles. *Transport Systems*. 2021. N4(22). 4-15 (In Russian). DOI: 10.46960/62045\_2021\_4\_4.
  9. Bizhaev A.V. Research of tractor power unit with electric drive parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 33-42 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.
  10. Plizga K. Analysis of Energy Consumption by Electric Agricultural Tractor Model Under Operating Conditions. *Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 25. N1. 1-12 (In English). DOI: 10.2478/agriceng-2021-0001.
  11. Burak P.I., Golubev I.G., Shakhov V.A. Analysis of the failures of electrical equipment and electronic control units of agricultural machinery during testing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025. N10(340). 40-42 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2025-10-40-42.
  12. Lobov N.V., Afanasyev V.V. Selection of test modes for electric vehicle motors in laboratory conditions. *World of transport and technological machines*. 2024. N4-3(87). 62-67 (In Russian). DOI: 10.33979/2073-7432-2024-4-3(87)-62-67.
  13. Gorobtsov A.S., Lyashenko M.V., Sokolov-Dobrev N.S. et al. Mathematical model of test stand. *Energy and Resource Saving: Industry and Transport*. 2016. N4(16). 16-21 (In Russian). EDN: WMTNZZD.
  14. Jasper S.P., Mendonça W.S.De., Jung E.A. et al. Energy efficiency of four-wheel drive tractor in sowing operation. *Ciencia Rural*. 2025. Vol. 55. N1 (In English). DOI: 10.1590/0103-8478cr20240141.
  15. Florentsev S.N., Uvarov A.A., Bayda S.V., Zhurov I.O. Circuitry, converter designs, and control algorithms for traction electric drives. *Russian Electrical Engineering*. 2025. T. 96. N6. 442-452 (In Russian). DOI 10.53891/00135860-2025-6-36-46.
  16. Vorob'ev A.R., Fedorov V.B. Methodology for monitoring the performance of measuring equipment for testing the propulsion systems. *Russian Aeronautics*. 2024. T. 67. N1. 209-214 (In Russian). EDN: NXUVSU.
  17. Kwon D., Ahn D.V., Kim J.G., Park Y.J. Effect analysis of motor power characteristics on the energy consumption of dual motor driven powertrain for electric tractor. *Journal of Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 49. N4. 465-475 (In English). DOI: 10.1007/s42853-024-00245-w.
  18. Baek S.Y., Jeon H.H., Kim W.S. et al. Simulation analysis of motor and battery characteristics using a validated model of an electric tractor. *Electronics*. 2025. Vol. 14. N24. 4872 (In English). DOI: 10.3390/electronics14244872.
  19. Godzhaev Z.A., Senkevich S.E., Maistrenko N.A. et al. Laboratory studies of agricultural mobile power vehicles with an autonomous electric drive of traction class 0.6. *Agricultural Engineering*. 2025. Vol. 27. N4. 15-24 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2025-4-15-24.
  20. Parkhomenko S.G., Parkhomenko G.G. Measurement of tractive effort at the drawbar of tractor in aggregate with mounted agricultural machine. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016. N4. 15-19 (In Russian). DOI: 10.17816/0321-4443-66128.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Прокопов М.А. – проведение исследования и описание результатов, подготовка текста;  
 Девянин С.Н. – постановка задачи, формулирование основной концепции исследования;  
 Кульчев А.Ю. – техническая подготовка стенда, сбор и обработка данных;  
 Бурак П.И. – анализ литературы, статистическая обработка.  
 Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

03.04.2026

15.05.2026

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Prokopov M.A. – conducting the study, describing the results, and preparing the manuscript;  
 Devyanin S.N. – problem statement and formulation of the main research concept;  
 Kulchev A.Yu. – test stand technical preparation, data collection and processing;  
 Burak P.I. – literature analysis and statistical processing.  
 The authors read and approved the final manuscript.