

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОЩНОГО СТЕНДА С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МОТОР-КОЛЁС

*Зеер В.А., Гражданцев Е.В., Сорокин А.А., Корытин И.И., Литвинов П.С.*  
*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

**Ключевые слова:** мощной стенд, автоматизированная система измерений, испытания мотор-колес, малогабаритный электротранспорт, системы управления электроприводом.

**Аннотация.** В статье представлены этапы проектирования однобарабанного мощного стенда с комбинированным нагрузочным устройством и автоматизированной системой измерений для испытания мотор-колес и их систем управления, включая аккумуляторные батареи, без участия самого транспортного средства. Проектируемый стенд позволяет: реализовывать различные по величине тормозной, за счет фрикционного дискового тормозного механизма с гидравлическим приводом, и инерционный, за счет дополнительных маховиков, моменты на беговом барабане; испытывать полнокомплектные мотор-колеса диаметром от 100 до 700 мм и мощностью до 5 кВт; обеспечивать прижимное усилие мотор-колеса к беговому барабану до 1500 Н. Алгоритм и интерфейс программы автоматизированной системы измерений, расчета и вывода результатов испытаний на монитор компьютера позволяют оператору активно участвовать в задании исходных данных и анализе полученных результатов.

## DESIGN OF A POWER STAND WITH AN AUTOMATED MEASUREMENT SYSTEM FOR TESTING MOTOR WHEELS

*Zeer V.A., Grazhdantsev E.V., Sorokin A.A., Koritin I.I., Litvinov P.S.*  
*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

**Keywords:** power bench, automated measurement system, motor-wheel testing, small-sized electric transport, electric drive control systems.

**Abstract.** The article presents the stages of designing a single-drum power bench with a combined load device and an automated measurement system for testing motor-wheels and their control systems, including batteries, without the participation of the vehicle itself. The designed stand allows: to realize various brake torques, due to the friction disc brake mechanism with a hydraulic drive, and inertial torques, due to additional flywheels, on the running drum; to test complete motor-wheels with a diameter of 100 to 700 mm and a power of up to 5 kW; to ensure the pressing force of the motor-wheel to the running drum up to 1500 N. The algorithm and interface of the program for the automated measurement system, calculation and display of test results on a computer monitor allow the operator to actively participate in setting the initial data and analyzing the results.

### Введение

Транспортные средства (ТС) с электрическим приводом колес в настоящее время находят все большее применение в различных областях. Причиной этому служит ряд преимуществ электротранспорта относительно ТС с традиционными ДВС, работающих на углеводородном топливе, таких как, отсутствие вредных выбросов, оптимальные для ТС тягово-скоростные свойства электродвигателей, лучшая адаптивность к реализации систем активной безопасности и переходу к беспилотному транспорту, и др. При этом использование в качестве электропривода мотор-колёс, особенно на малогабаритных ТС, является перспективным (рис. 1) [1, 2].

Существующие мощные стенды для испытания ТС подразделяются на типы.

1 – Роликовые: *a* – инерционные – бывают одно и двух роликовые, для одной или двух осей автомобиля и мотоциклов. Принцип работы - машина встает колесами на барабаны и начинает их раскручивать. Имея неизменный момент инерции барабанов, информацию скорости их вращения и времени, затраченного на раскрутку, специальная программа на компьютере вычисляет крутящий момент и мощность, реализуемую на колесах.

б – Нагрузочные – бывают двух роликовые, для одной или двух осей автомобиля и мотоциклов. В таких стендах торможением руководит специальное нагрузочное устройство, которое может быть: гидравлическим; фрикционным; электрическим. Управляется нагрузочное устройство с помощью компьютера, что позволяет ему работать в режиме постоянных оборотов, при различных открытиях регулятора мощности (дросселя).

в – Комбинированные – бывают двух роликовые, для одной или двух осей автомобиля и мотоциклов. Сочетают два типа нагрузочных устройств, описанных выше.

2 – Ступичные – прикрепляется непосредственно к осям, тем самым устраняя недостатки, вызванные взаимодействием шины и ролика, такие как – шум, нагрев шин, боковые уводы, относительное проскальзывание шины и ролика и др. Испытания осуществляются со снятием колес и подключением стандартного переходника (адаптера) на ступицы. Позволяют давать очень точные показания при различных частотах вращения колес (рис. 2) [3-5].



Рис. 1. Примеры малогабаритных ТС с электроприводом (а) и конструкции мотор-колес (б)

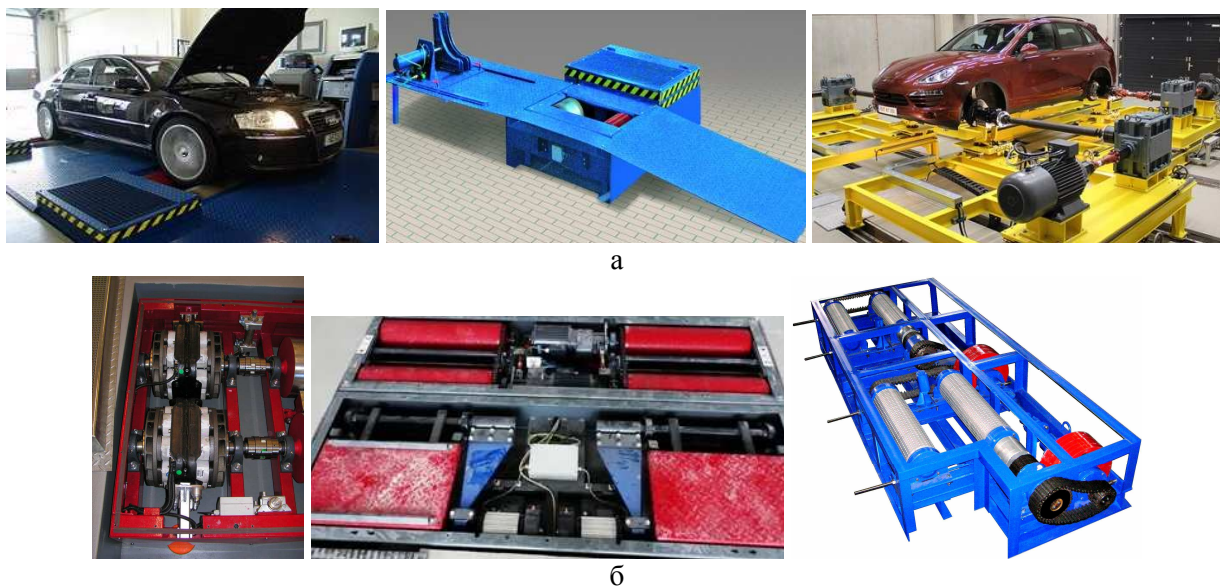


Рис. 2. Примеры существующих мощностных стендов (а, 2<sup>х</sup> барабанный, переносной для мотоциклов, ступичный) и нагрузочных устройств (б, фрикционный тормоз с электроприводом, электротормоз, инерционный)

Однако существующие мощностные стенды из-за своих конструктивных особенностей не могут в полной мере обеспечить испытания отдельных мотор-колес вне ТС, что обуславливает актуальность настоящего проекта.

### Основная часть

Проектируемый стенд состоит из 3 частей: механической, измерительной и программной. Механическая часть состоит из силовой рамы, на которой размещаются на подшипниках беговой барабан с валом, на концах которого устанавливаются дисковый фрикционный тормоз и съемные инерционные массы (маховики) (рис. 3). Тормозной суппорт в сборе со скобой и тормозными колодками связан с рамой электронным динамометром. Система гидравлического привода дискового тормозного механизма включает в себя главный

цилиндр, трубопровод со встроенным манометром, рабочий цилиндр дискового тормоза, расширительный бачок. Рычаг привода выполнен с возможностью механической фиксации давления в гидравлическом приводе. На раме по середине беговой дорожки барабана шарнирно закреплена телескопическая «вилка» с отверстиями для крепления на ней мотор-колес различных диаметров и подвешивания грузов.

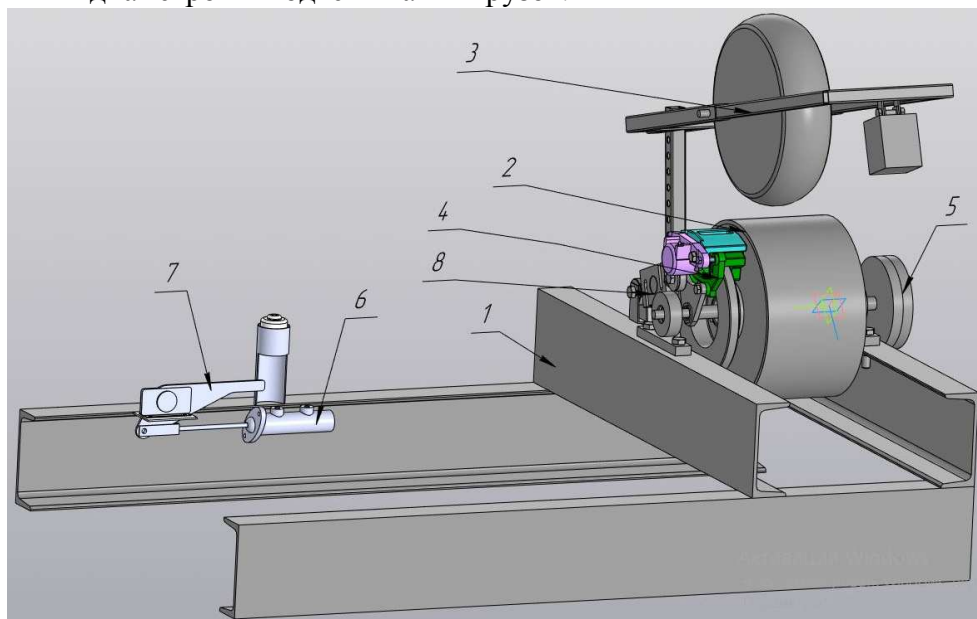


Рис. 3. Трехмерная модель проектируемого мощного стенда 1 – силовая рама; 2 – беговой барабан с валом и подшипниковыми узлами; 3 – телескопическая «вилка»; 4 – дисковый фрикционный тормоз; 5 – съемные инерционные массы (маховики); 6 – гидравлический привод дискового тормозного механизма; 7 – рычаг привода; 8 – электронный динамометр

Измерительная часть включает в себя (рис. 4): 2 датчика частоты вращения для бегового барабана и мотор-колеса с ответными частями (применяем 2 лазерных светоизлучателя, 2 фотоприемника с настраиваемым логическим выходом, 2 диска с отверстиями); электронный динамометр (применяем тензорезисторный датчик YZC-516C 1.5t) и модуль аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) НХ711 для подключения тензорезисторного датчика к Ардуино; АЦП – микроконтроллер Arduino Uno.

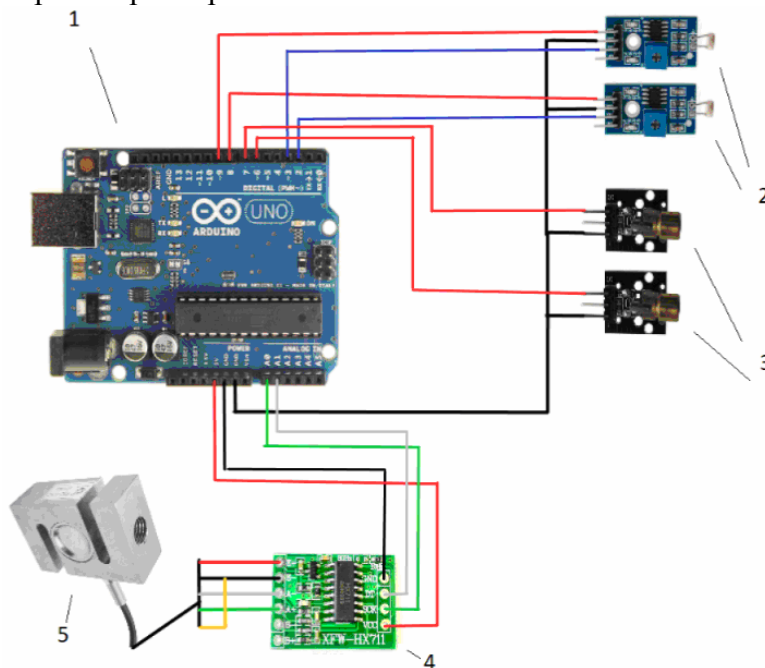


Рис. 4 Схема подключения системы измерения к АЦП Arduino Uno: 1 – плата Ардуино Уно; 2 – фотоприемники; 3 – лазерные светоизлучатели; 4 – АЦП НХ711; 5 – тензодатчик YZC-516C

Программная часть включает компьютер, алгоритм и интерфейс программы регистрации параметров измерений, расчета и вывода результатов испытаний на монитор.

При проведении испытаний на телескопическую «вилку» устанавливается мотор-колесо и прижимается к барабану за счет подвесного груза. Масса груза выбирается из условия равенства прижимной силы мотор-колеса к беговому барабану и действующего веса на мотор-колесо на реальном ТС, для которого оно может применяться, Н:

$$F_{np} = m_{cp} \cdot g \cdot \frac{L}{(L-l_2)} \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $m_{cp}$  – масса, подвесного груза, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – длина телескопической «вилки», м;  $l_2$  – длина телескопической «вилки», от точки крепления оси мотор-колеса до подвеса, м;  $\alpha$  – угол между телескопической «вилкой» и силовой рамой, град. (рис. 5).

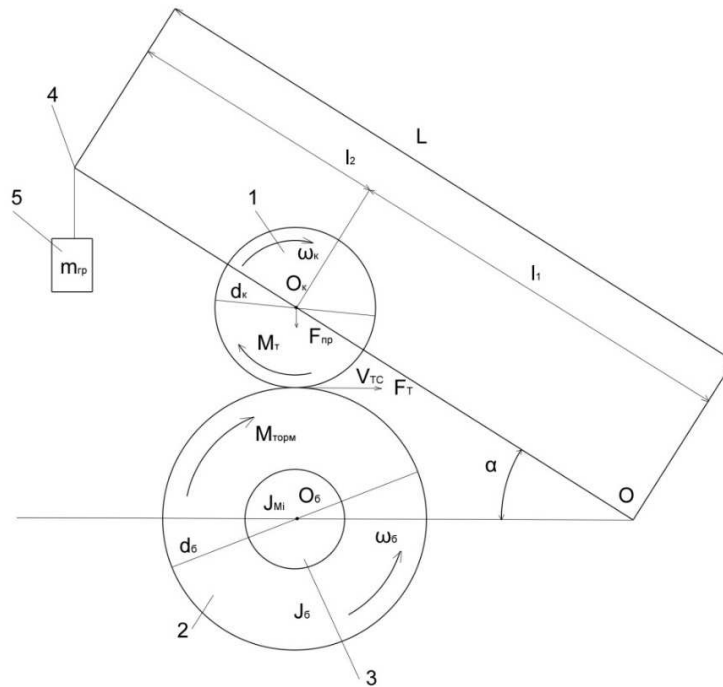


Рис. 5 Расчетная схема проектируемого стенда с испытуемым мотор-колесом: 1 – мотор-колесо; 2 – беговой барабан; 3 – съемные маховики; 4 – телескопическая «вилка»; 5 – подвесной груз

Далее пользователь вводит исходные (начальные) данные необходимые для дальнейшей работы программы (рис. 6) – это: диаметр мотора-колеса  $d_k$ , м; диаметр бегового барабана  $d_b$ , м; средний радиус тормозного диска (место приложения тормозной силы от колодок)  $r_{mд}$ , м; момент инерции бегового барабана в сборе, кг м<sup>2</sup>:

$$J_{\bar{b}} = J_{\bar{b}\bar{b}} + J_{\bar{a}\bar{b}} + J_{mд},$$

где  $J_{\bar{b}\bar{b}}$  – момент инерции бегового барабана, кг м<sup>2</sup>;  $J_{\bar{a}\bar{b}}$  – момент инерции вала барабана, кг м<sup>2</sup>;  $J_{mд}$  – момент инерции тормозного диска, кг м<sup>2</sup>; момент инерции  $i$ -го маховика в виде цельнометаллического диска, кг м<sup>2</sup>:

$$J_{Mi} = \frac{m_{Mi} \cdot r_{Mi}^2}{2},$$

где  $m_{Mi}$  и  $r_{Mi}$  – масса и радиус  $i$ -го маховика, соответственно, кг, м.

Для определения необходимого момента инерции съемных маховиков воспользуемся балансом кинетических энергий поступательного движения условного ТС и вращательного движения инерционных масс стенда, из которого следует:

– для поступательного движения условного ТС, на котором предполагается установка испытуемого мотор-колеса, Вт:

$$E_k = \frac{m_{TC} \cdot V_{TC}^2}{2},$$

– для вращательного движения бегового барабана, Вт:

$$E_k = J_{\Sigma} \cdot \omega_{\delta}^2,$$

тогда 
$$\frac{m_{TC} \cdot V_{TC}^2}{2} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{\delta}^2}{2},$$

где  $m_{TC}$  – масса условного ТС, кг;  $V_{TC}$  – скорость условного ТС, м/с;  $\omega_{\delta}$  – частота вращения бегового барабана, соответствующая скорости условного ТС без учета проскальзывания,  $s^{-1}$ :

$$\omega_{\delta} = \frac{2V_{TC}}{d_{\delta}},$$

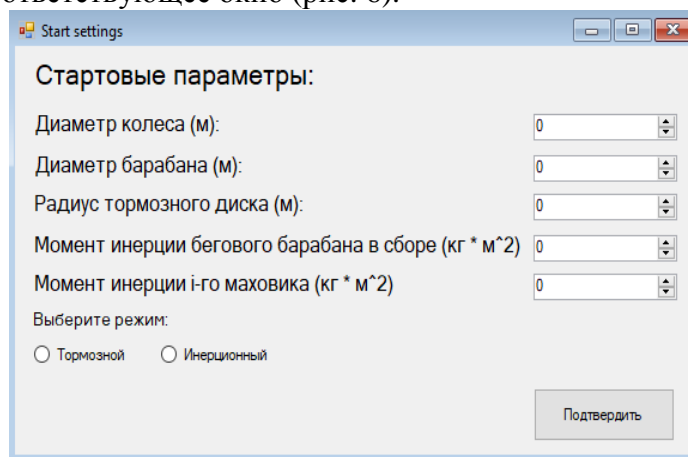
$J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции вращающихся частей бегового барабана в сборе и маховиков,  $kg \cdot m^2$ :

$$J_{\Sigma} = J_{\delta} + J_{Mi},$$

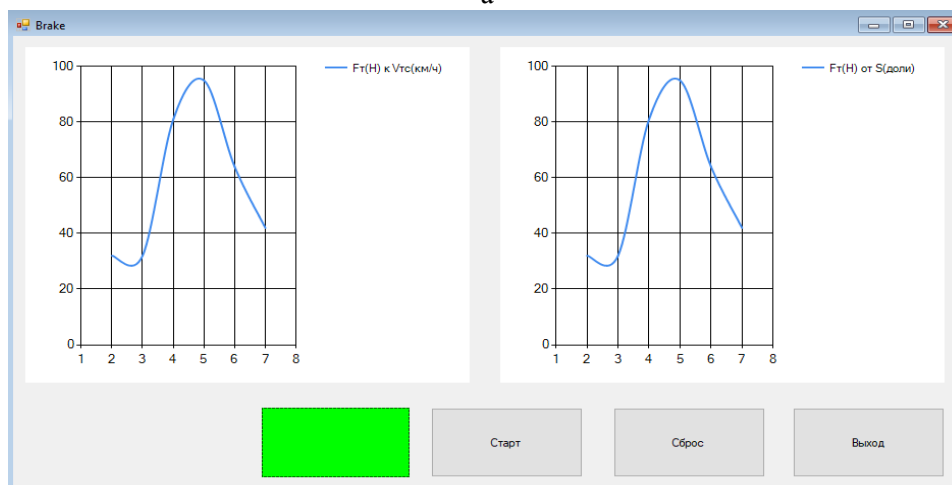
отсюда 
$$J_{Mi} = \frac{m_{TC} \cdot V_{TC}^2}{W_{\delta}^2} - J_{\delta}.$$

При расчете  $J_{Mi}$  необходимо принимать скорость ТС  $V_{TC}$  и соответственно частоту вращения бегового барабана  $\omega_{\delta}$  максимальные значения.

Для получения разгонной характеристики и оценки рекуперативных свойств мотор-колеса выбирается соответствующее окно (рис. 6).

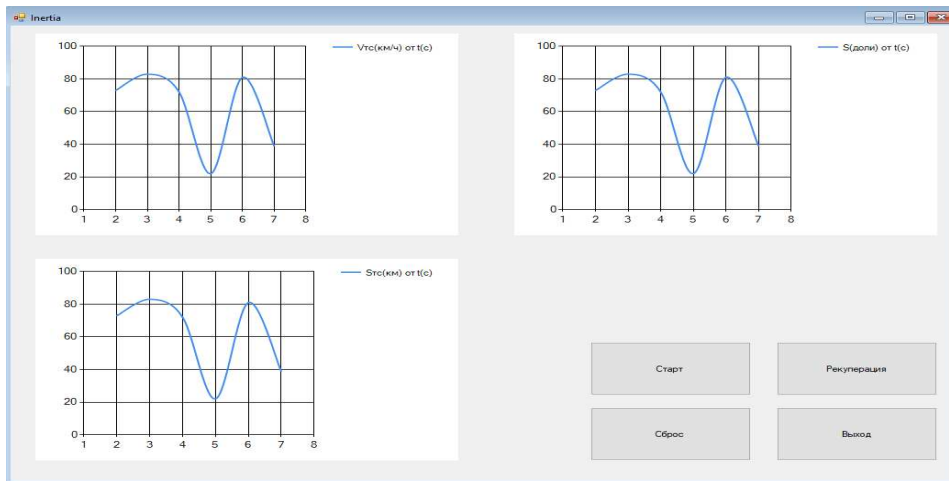


а



б

Рис. 6. Интерфейс программы проектируемого мощного стенда: а – стартовые настройки; б – работа стенда в «тормозном» режиме



В

Рис. 6. Интерфейс программы проектируемого мощного стенда: в – работа в «инерционном» режиме

Мотор-колесо при заданном системой уровне мощности приводит во вращение беговой барабан с маховиками до определенной программой испытаний частоты вращения барабана или установившегося режима (когда угловое ускорение бегового барабана отсутствует), после чего электропитание с мотор-колеса отключается и оно входит в режим рекуперации, либо нейтрального выбега, вплоть до полной остановки. Датчики частоты вращения мотор-колеса, бегового барабана посредством АЦП передают сигналы, алгоритм программы обрабатывает и выводит на монитор полученные основные данные в виде зависимостей (рис. 7):  $V_{TC}=f(t)$  – скорость ТС от времени разгона  $t_p$ , затем от времени замедления  $t_3$ ;  $S_{TC}=f(t)$  – путь, пройденный условным ТС, от времени разгона  $t_p$ , затем от времени замедления  $t_3$ ,  $s=f(t)$  – коэффициент скольжения от времени разгона  $t_p$ , затем от времени замедления  $t_3$  (рис. 6).

Скорость ТС с учетом проскальзывания определяется, м/с:

$$V_{TC} = \omega_K \cdot \frac{d_K}{2} \cdot s,$$

где  $\omega_K$  – угловая частота вращения мотор-колеса,  $c^{-1}$ ;  $s$  – относительное проскальзывание мотор-колеса и бегового барабана:

$$s = \frac{(\omega_K \cdot d_K - \omega_\sigma \cdot d_\sigma)}{\omega_\sigma \cdot d_\sigma}.$$

Путь, пройденный условным ТС, определяется, м:

$$s_{TC} = \omega_\sigma \cdot \pi d_\sigma.$$

Для определения тягово-скоростных свойств мотор-колеса выбирается соответствующее окно (рис. 6). Мотор-колесо раскручивает беговой барабан до определенной программой испытаний частоты вращения, затем электропитание на мотор-колесе остается неизменным (на заданном системой уровне мощности). В системе гидравлического привода дискового тормозного механизма создается давление путем перемещения рычага привода главного цилиндра с кратковременной фиксацией установившихся режимов торможения бегового барабана вплоть до наступления режима 70-80% проскальзывания мотор-колеса относительно бегового барабана. Датчики частоты вращения мотор-колеса, барабана, тензодатчик посредством АЦП передают сигналы, алгоритм программы обрабатывает и выводит на монитор полученные основные данные в виде зависимостей (рис. 7):  $F_T=f(V_{TC})$  – сила тяги от скорости ТС;  $F_T=f(s)$  – сила тяги от коэффициента скольжения (рис. 6) и величины максимальной механической мощности  $P_M$ .

Сила тяги, реализуемая мотор-колесом, определяется, Н:

$$F_T = \frac{2 \cdot M_T}{d_K},$$

где  $M_T$  – крутящий момент на мотор-колесе, Нм.

Поскольку сопротивление движению условного ТС создается тормозным механизмом на беговом барабане  $M_{\text{торм}}$ , то  $M_T = M_{\text{торм}} = F_{\text{торм}} \cdot r_{\text{мб}}$ , тогда  $F_T = \frac{2 \cdot F_{\text{торм}} \cdot r_{\text{мб}}}{d_K}$ .

Механическая мощность, реализуемая на мотор-колесе, без учета потерь в шинах мотор-колеса при взаимодействии с беговым барабаном и подшипниках опор вала бегового барабана, Вт;

$$P_M = F_T \cdot V_{\text{ТС}}.$$

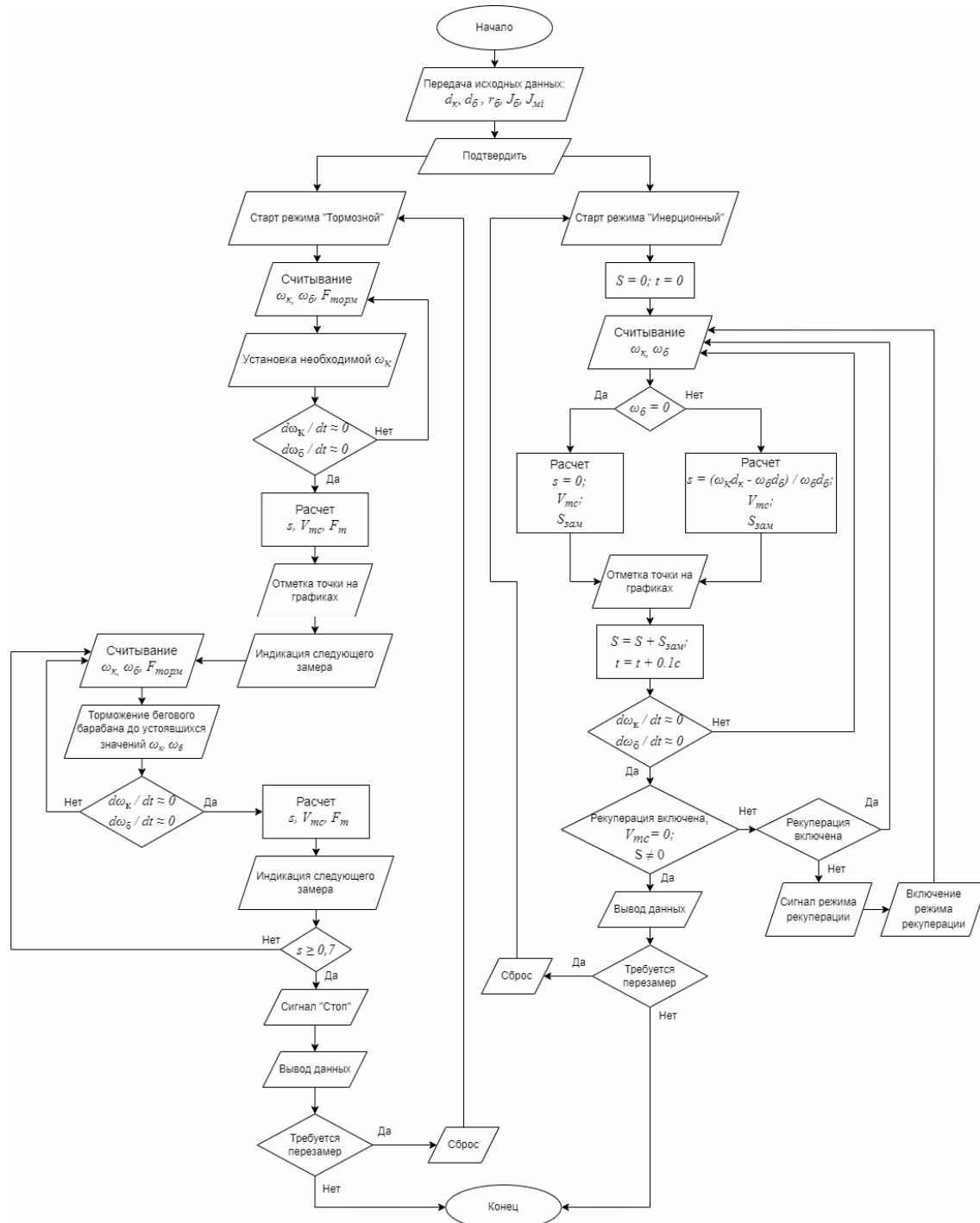


Рис. 7. Алгоритм программы обработки и вывода информации проектируемого мощностного стенда при работе в «тормозном» и «инерционном» режимах

## Результаты, выводы

Проектируемый однобарабанный мощностной стенд позволяет проводить испытания мотор-колес и их систем управления, включая аккумуляторные батареи, мощностью до 5 кВт для малогабаритных ТС. Использование в проектируемом стенде двух типов нагружающих устройств (фрикционного и инерционного) позволяет в полной мере определять тягово-скоростные свойства, разгонную динамику и оценивать рекуперативные свойства мотор-колес и их систем управления [6-8]. Конструкция стенда позволяет проводить испытания мотор-колес диаметром от 100 до 700 мм для малогабаритных ТС и обеспечивать в заданных диапазонах прижимное усилие мотор-колес к беговому барабану (имитировать весовые характеристики ТС) и инерционные моменты [9, 10] (имитировать инерционные силы, возникающие при движении ТС). Измерительный комплекс, программа регистрации и обработки данных обладают достаточной точностью измерений, интерактивностью в части задачи изменяющихся входных параметров и информативностью результатов испытаний.

## Список литературы

1. Афанасьев А.Н., Сазонов М.В. Перспективы развития электротранспорта // Символ науки: международный научный журнал. – 2020. – № 12-1. – С. 29-31.
2. Зайцева М.М., Мегера Г.И., Хаперская И.М., Копылов Ф.С., Крымский В.С., Кужель Д.М. Основные тенденции развития индустрии электротранспорта // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1(52). – С. 97.
3. Васильев М.В. Динамометрические мощностные стенды: виды, описание и назначение // Студенческий вестник. – 2020. – № 18-8(116). – С. 53-56.
4. Мелешин В.В., Науменко Б.С. Методика диагностирования автотранспортных средств на инерционном стенде по мощностным показателям // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2018. – № 1. – С. 60-66.
5. 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. – №4(22). – С. 4-15. – DOI: 10.46960/62045\_2021\_4\_4.
6. Наниев К.А., Цховребов З.Р. Применение рекуперации в мощностных автомобильных стендах // Студенческая наука – агропромышленному комплексу: Научные труды студентов Горского Государственного аграрного университета. Том 54 (Часть 2). – Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2017. – С. 162-165.
7. Федотов А.И., Яньков О.С., Чернышков А.С. О тестовых режимах контроля тягово-динамических свойств колёсных транспортных средств с электрическим приводом на стендах с беговыми барабанами // Автомобильная промышленность. – 2022. – №8. – С. 16-21.
8. Мамаев А.Н., Балабина Т.А., Гаевский В.В. Механика взаимодействия колеса с барабаном // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной научно-технической конференции, Иркутск, 23-26 апреля 2019 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 333-345.
9. Рамазанов Д.Ф., Губенко А.С. Разработка методики комплексной диагностики мотор-колес легких транспортных средств // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 17-19 мая 2021 года. Том I. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 233-235.
10. Яньков О.С. Контроль технического состояния автомобилей, электромобилей и беспилотных колёсных транспортных средств на стендах с беговыми барабанами // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: Сборник научных трудов, посвященный 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по материалам 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 26-27 января 2021 года. – М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 203-212.

## References

1. Afanasiev A.N., Sazonov M.V. Prospects for the development of electric transport // Symbol of science: international scientific journal. 2020, no. 12-1, pp. 29-31.
2. Zaitseva M.M., Megera G.I., Khaperskaya I.M., Kopylov F.S., Krymsky V.S., Kuzhel D.M. The main trends in the development of the electric transport industry // Engineering Bulletin of the Don. 2019, no. 1(52), pp. 97.
3. Vasiliev M.V. Dynamometric power stands: types, description and purpose // Student Bulletin. 2020, no. 18-8(116), pp. 53-56.
4. Meleshin V.V., Naumenko B.S., Methods for diagnosing vehicles on an inertial stand according to power indicators // Intellect. Innovation. Investments. 2018, no. 1, pp. 60-66.
5. Byakov K. E., Ivanenkov V. V., Kholodenko V. B., Chudakov O. I. A review of the designs of modern dynamometer stands for testing wheeled vehicles // Transport Systems. 2021, no. 4(22), pp. 4-15. DOI: 10.46960/62045\_2021\_4\_4.



6. Naniev K.A., Tskhovrebov Z.R. Application of recuperation in power automobile stands // Student science – agro-industrial complex: Scientific works of students of the Gorsky State Agrarian University. Volume 54 (Part 2). – Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University, 2017. – P. 162-165.
7. Fedotov A. I., Yankov O.S., Chernyshkov A.S. About test modes for monitoring the traction and dynamic properties of wheeled vehicles with an electric drive on stands with running drums // Automotive industry. 2022, no. 8, pp. 16-21.
8. Mamaev A.N., Balabina T.A., Gaevsky V.V. Mechanics of interaction of a wheel with a drum // Safety of wheeled vehicles under operating conditions: materials of the 106th International Scientific and Technical Conference, Irkutsk, April 23-26, 2019. – Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2019. – P. 333-345.
9. Ramazanov D.F., Gubenko A.S. Development of a methodology for complex diagnostics of the motor-wheels of light vehicles // New technologies for the oil and gas region: materials of the International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists, Tyumen, May 17-19, 2021. Volume I. – Tyumen: Tyumen Industrial University, 2021. – P. 233-235.
10. Yankov O.S. Control of the technical condition of cars, electric vehicles and unmanned wheeled vehicles on stands with running drums // Problems of technical operation and car service of rolling stock of road transport: Collection of scientific papers dedicated to the 85th anniversary of the department EATiS MADI, based on the materials of the 79th scientific, methodological and research conference MADI, Moscow, January 26-27, 2021. – M.: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 2021. – P. 203-212.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Зеер Владимир Андреевич</b> – кандидат технических наук, доцент	<b>Zeer Vladimir Andreevich</b> – candidate of technical sciences, associate professor
<b>Гражданцев Евгений Викторович</b> – кандидат технических наук, доцент	<b>Grazhdantsev Evgeniy Victorovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor
<b>Сорокин Алексей Александрович</b> – старший преподаватель	<b>Sorokin Aleksey Aleksandrovich</b> – senior teacher
<b>Корытин Илья Игоревич</b> – студент	<b>Koritin Ilya Igorevich</b> – student
<b>Литвинов Павел Сергеевич</b> – кандидат технических наук, доцент	<b>Litvinov Pavel Sergeevich</b> – candidate of technical sciences, associate professor
egrazhdantsev@sfu-kras.ru	

Получена 29.11.2022