

На правах рукописи

УДК 629.33

Чжэн Хуайюй

**РАЗРАБОТКА ЗАКОНА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОДВОДИМОЙ МОЩНОСТИ К КОЛЕСАМ  
ПЛАНЕТОХОДА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ**

Специальность 2.5.11. – Наземные транспортно-технологические средства и  
комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре колесных машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель

**Котиев Георгий Олегович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

**Беляков Владимир Викторович**

доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, начальник управления научно-исследовательских и инновационных работ ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

**Курмаев Ринат Ханяфиевич**

кандидат технических наук, доцент, директор научно-образовательного центра ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Курганский государственный университет».

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г. в \_\_:\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.13 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

д.т.н., доцент



Косицын Б.Б.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Интенсивные исследования космического пространства, Луны, планет и их спутников представляют одну из фундаментальных задач, решаемых современной наукой. Высокую эффективность исследований на обширной территории в течение длительного времени обеспечили аппараты, контактирующие с опорной поверхностью и перемещающиеся по поверхности планет и Луны.

Управление движением планетоходов (выбор направления перемещения) происходит дистанционно с учетом задержки по времени на прохождение сигнала от пункта управления и обратно. Распознавание условий движения для предотвращения потери подвижности, выбор режима движения (рациональное распределение мощности по двигателям) происходит на борту с отправкой информации на удаленный пункт управления. При создании планетоходов используют доступную информацию о состоянии опорной поверхности и проектируют двигатель с приводом для обеспечения наилучших тягово-энергетических характеристик (высокая удельная сила тяги при минимуме энергозатрат на единицу пройденного пути) и тягово-сцепных характеристик (высокая удельная сила тяги при минимуме буксования двигателя). Ввиду отсутствия полной информации об условиях движения обеспечить «абсолютную» подвижность планетохода не представляется возможным. Однако располагая указанными характеристиками двигателя, с использованием данных о текущем взаимодействии двигателя с внешней средой в процессе движения, возможно принять решение о рациональном распределении мощности бортового источника энергии между двигателями с целью снижения энергозатрат и обеспечения проходимости.

**Целью работы** является повышение энергоэффективности и проходимости планетохода с индивидуальным приводом колес путем рационального подведения мощности к двигателям.

Для достижения цели в работе поставлены и решены **задачи**:

- разработана цифровая система управления и измерения для стенда «Грунтовой канал» и математическая модель прямолинейного движения одиночного колеса в условиях стенда;
- выполнены экспериментальные исследования на стенде «Грунтовой канал» для определения характеристик взаимодействия колес с деформируемым и твердым опорным основанием, а также верифицирована математическая модель качения колеса в условиях стенда на основе экспериментальных данных;
- разработан метод определения характеристик взаимодействия колес с опорным основанием, суть которого заключается в установлении близкой к линейной зависимости удельной силы тяги от удельной окружной силы в определенном интервале на основе экспериментальных данных;
- разработан ходовой макет планетохода с индивидуальным приводом колесной формулой 8x8 и математическая модель прямолинейного движения макета. Особенностью макета является использование конструктивных элементов с датчиками для измерения продольной и вертикальной нагрузки на

колесах. Математическая модель полностью соответствует макету по параметрам и принципам управления;

- проведен сравнительный анализ математической модели прямолинейного движения и ходового макета для подтверждения возможности оценки энергоэффективности законов управления распределением мощности;

- разработан закон распределения подводимой мощности к колесам планетохода с индивидуальным приводом при прямолинейном движении по опорной поверхности в зависимости от условий движения;

- проведено сравнение результатов теоретических исследований различных законов распределения мощности для привода колес, подтвердившее целесообразность применения разработанного закона.

**Научная новизна работы** заключается:

- в разработке математической модели стенда «Грунтовой канал» при прямолинейном качении одиночного колеса, отличающейся учетом динамики конструктивных элементов стенда, что позволяет обоснованно идентифицировать результаты исследований взаимодействия колеса с опорным основанием на стенде;

- в разработке математической модели прямолинейного движения и создании макета планетохода с индивидуальным приводом. Особенностью модели является наличие системы управления движением, характеристики которой получены по результатам реализации на ходовом макете, включая датчики, контроллеры, приводы движителей. Модель позволяет исследовать различные законы управления потоками мощности - «типы трансмиссий» с использованием экспериментальных тягово-энергетических и тягово-сцепных характеристик взаимодействия движителя с опорной поверхностью;

- в установлении линейной закономерности изменения удельной силы тяги от удельной окружной силы при прямолинейном качении деформируемого колеса по деформируемому опорному основанию в определенном интервале на основе экспериментальных данных;

- в разработке закона распределения подводимой мощности к колесам планетохода для повышения энергоэффективности и проходимости, суть которого заключается в управлении силой тяги каждого колеса в зависимости от характеристик взаимодействия с опорным основанием;

- в результатах сравнения теоретических и экспериментальных исследований характеристик прямолинейного движения планетохода колесной формулой 8x8 с использованием разных законов распределения мощности между колесами.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечивается:

- использованием обоснованных физических и математических моделей;
- применением программного комплекса MATLAB для программной реализации математических моделей, а также проведением их верификации с помощью натурных экспериментов;

- удовлетворительной согласованностью результатов работы и ее отдельных частей с известными (как численными, так и экспериментальными) данными других авторов.

**Практическая ценность** результатов работы состоит в том, что:

- в результате выполненных исследований по повышению энергоэффективности и проходимости планетохода с колесным двигателем, предназначенным для перемещения по поверхности Луны, создан его макет с системой управления и его математическая модель для имитации различных законов управления потоками мощности к двигателям – «типов трансмиссий» для проведения сравнительных исследований энергоэффективности движения;

- создана программная реализация математической модели, которая приспособлена для исследования различных законов распределения мощности по колёсам для выбранных условий движения, что позволяет ускорить процесс разработки системы управления распределением мощности по колесам планетохода.

**На защиту выносятся** основные положения научной новизны, выводы и результаты исследований.

**Личный вклад** автора состоит в том, что представленные результаты получены автором или при его непосредственном участии. Автором лично разработаны математические модели, создан ходовой макет планетохода с индивидуальным приводом колес и электронной системой управления распределением мощности по колесам, создана система управления и измерений стенда «Грунтовой канал», выполнены эксперименты и комплексные исследования взаимодействия колесного двигателя с опорным основанием и также разработан новый закон подведения мощности к двигателям.

**Общая методика исследований.**

Исследования проводились с использованием численных методов моделирования прямолинейного движения планетохода при различных схемах трансмиссии и методов оценки проходимости и энергоэффективности планетоходов. В работе использованы результаты экспериментов, проводившихся в разные годы на кафедрах СМ9 и СМ10 МГТУ им. Н. Э. Баумана (К2 и К3 МВТУ им. Н. Э. Баумана).

**Реализация результатов работы.**

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре колесных машин МГТУ им. Н. Э. Баумана, а также внедрены в ПАО «КАМАЗ» в работах по луноходной тематике.

**Апробация работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

- на научных семинарах кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2018 – 2022 г.);

- на конференции «Будущее Машиностроения России» в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2020 г.);

- на МНПК «Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология» (Якутск, 2020 г.);
- на международном автомобильном научном форуме (МАНФ-2021) «Наземные инновационные транспортные средства с низким углеродным следом» (Москва, 2021 г.);
- на международном автомобильном научном форуме (МАНФ-2022) «Устойчивое развитие отечественного автопрома в современных условиях» (Москва, 2022 г.).

#### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 2 научные работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, общим объемом 1,1 п.л.

#### **Структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, а также списка литературы. Работа выполнена на 121 листе машинописного текста, включает 65 рисунков и 2 таблицы. Список литературы насчитывает 112 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования: разработки закона управления распределением мощности по колесам планетохода для повышения его проходимости и энергоэффективности при движении по поверхности Луны. Также приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы и отражены основные положения научной новизны, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** диссертации кратко представлены история развития планетоходов и их движителей, основные положения, связанные с обеспечением их проходимости. Проанализированы методы оценки проходимости, а также параметры, используемые при ее оценке. Проведен анализ математических моделей отечественных и зарубежных учёных по исследованию прямолинейного движения колесного движителя по опорным поверхностям, также приведен анализ методов моделирования и проведения экспериментов для исследования проходимости планетохода.

Особенно отмечены работы русских, китайских, европейских, японских и американских ученых. В том числе ученые: Рождественский Ю. Л., Забавников Н. А., Келлер А. В., Бабков В. Ф., Безрук В. М., Агейкин Я. С., Шухман С. Б., Чудаков Е. А., Андреев А. Ф., Кемурджиан А. Л., Громов В. В., Жуковский Н. Е., Беляков В. В., Лефаров А. К., Вольская Н. С., Наумов В. Н., Косицын Б. Б., Горелов В. А., Котиев Г. О., Kobayashi T., Fujiwara Y., Yamakawa J., Kuroda Y., Kojima K. A., Nakashima H., Fujii H., Oida A., Lenzo B., Sorniotti A., Eto R., Sakata K., Ding L., Zhang T. X., Zhang H, Li S. M., Liao Q. B., Huang Han, Bekker M.G., Reese A., Wong J.Y., Ванцевич В.В, Janosi Z., Hanamoto B., Meirion-Griffith G., а также научные школы МГТУ им. Н.Э. Баумана, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Харбинского политехнического института, университета Алабамы, ВНИИТрансмаш, ЮУрГУ и др..

Проведен анализ современного состояния вопроса в части законов управления распределением мощности, подводимой к двигателям полноприводной колесной машины. Сделан вывод, что решение научной задачи, связанной с управлением распределением мощности по колёсам планетохода, на сегодняшний день имеет возможность для дальнейшего совершенствования. В заключение главы сформулированы основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели работы.

Во второй главе представлен экспериментально-расчетный метод определения тягово-сцепных и тягово-энергетических характеристик колесного движителя планетохода. Представлено подробное описание стенда (Рис. 1.), мероприятий по модернизации (Рис. 2.) и математической модели качения колеса в условиях стенда, методики проведения эксперимента на стенде «Грунтовой канал» и результатов анализа экспериментальных данных. Определена совокупность силовых и кинематических параметров движения, необходимая для моделирования взаимодействия колеса с опорным основанием.

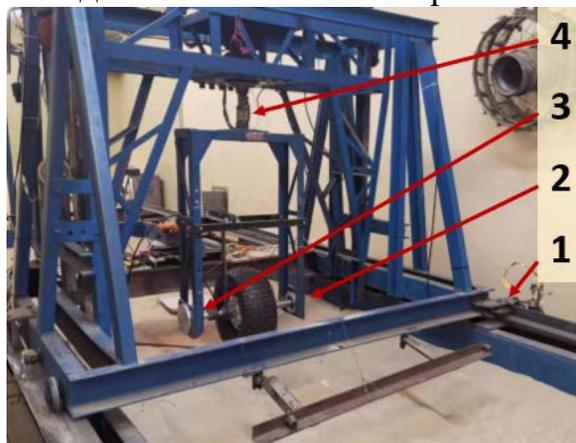


Рис. 1. Общий вид стенда «Грунтовой канал», где 1 – датчик пройденного пути, 2 – датчик угла поворота колеса, 3 – датчик момента, 4 – датчик продольной и боковой сил

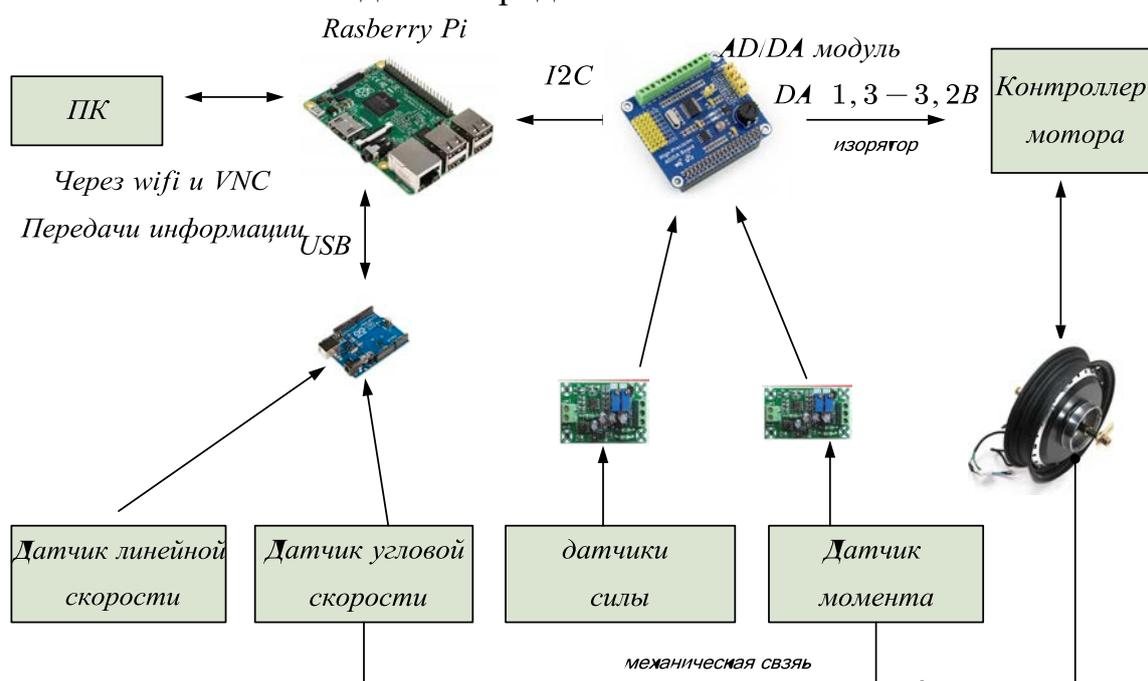


Рис. 2. Структурная схема системы управления и измерения стенда

В ходе исследования взаимодействия колесного движителя с опорной поверхностью в условиях стенда «Грунтовой канал» разработана математическая модель стенда. Расчетная схема движения колесного движителя в ведущем режиме в рамках стенда «Грунтовой канал» представлена на Рис. 3. В соответствии со схемой получена система уравнений (1), описывающих динамику колесного движителя в условиях стенда.

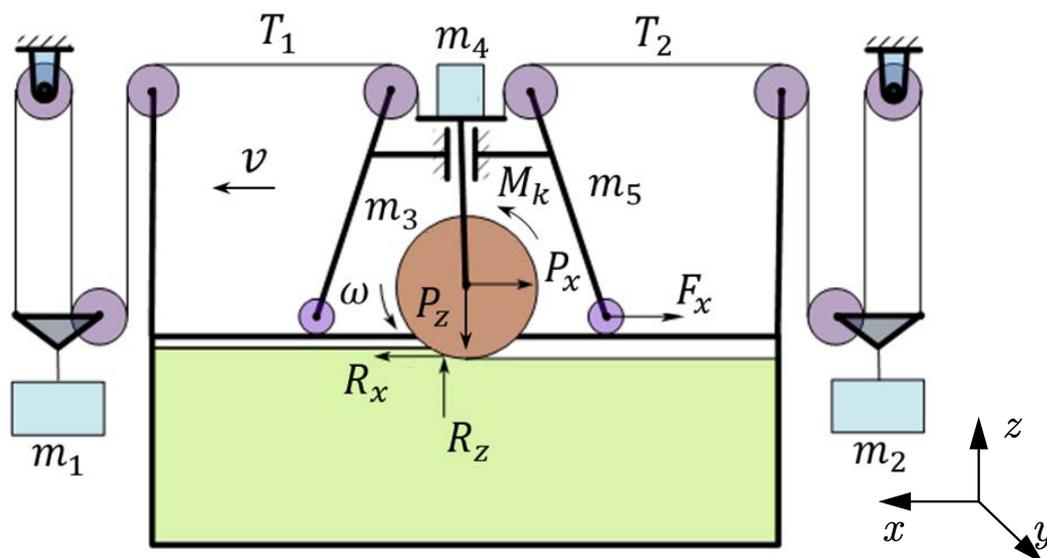


Рис. 3. Расчетная схема движения колесного движителя в ведущем режиме на стенде «Грунтовой канал»

На Рис. 3. приняты следующие обозначения:  $m_1$  и  $m_2$  – массы передних и задних грузов в системе противовесов соответственно;  $m_3$  – масса колесного движителя;  $m_4$  – масса части тележки, которая непосредственно присоединена к испытываемому колесу (является компонентом вертикальной нагрузки на колесный движитель);  $m_5$  – масса части тележки, которая опосредованно прикрепена к испытываемому колесу. Эта масса является составляющей подвижных частей тележки, движущихся вместе с колесом;  $v$  – линейная скорость тележки;  $\omega$  – угловая скорость вращения колесного движителя;  $M_k$  – вращающий момент ступичного электродвигателя;  $R_z$  – нормальная реакция в пятне контакта колесного движителя с опорной поверхностью;  $R_x$  – продольная реакция в пятне контакта колесного движителя с опорной поверхностью;  $P_z$  – вертикальная нагрузка, прижимающая колесо к опорной поверхности;  $P_x$  – продольное усилие на оси колесного движителя со стороны тележки;  $F_x$  – сила сопротивления движению тележки стенда;  $T_1$  и  $T_2$  – силы натяжения тросов переднего и заднего противовесов стенда соответственно.

$$\begin{cases} m_5 \dot{v} = P_x - F_x + T_1 - T_2 \\ (m_3 + m_4) \dot{v} = R_x - P_x \\ J_k \dot{\omega} = M_k - M_k^f \end{cases}, \quad (1)$$

где  $J_k$  – момент инерции колесного движителя (с учетом момента инерции мотора) относительно оси вращения;  $M_k^f$  – момент взаимодействия колесного движителя с опорной поверхностью.

Натурные эксперименты на стенде «Грунтовой канал» проводились для шины WANDA 15x6.0-6 NHS (радиус качения в свободном режиме  $r_0 = 0,18$  м), применяемой на разрабатываемом макете планетохода. Результаты некоторых экспериментов представлены на Рис. 4 – 5.

Исходя из представленных результатов можно предположить, что зависимость удельной силы тяги от удельной окружной силы в определённом интервале близка к линейной и может быть аппроксимирована методом наименьших квадратов как линейная функция:

$$\varphi = \frac{P_x}{P_z} = K^* \frac{M_k}{P_z r_0} + B^*, \quad (2)$$

где  $K^*$ ,  $B^*$  - коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

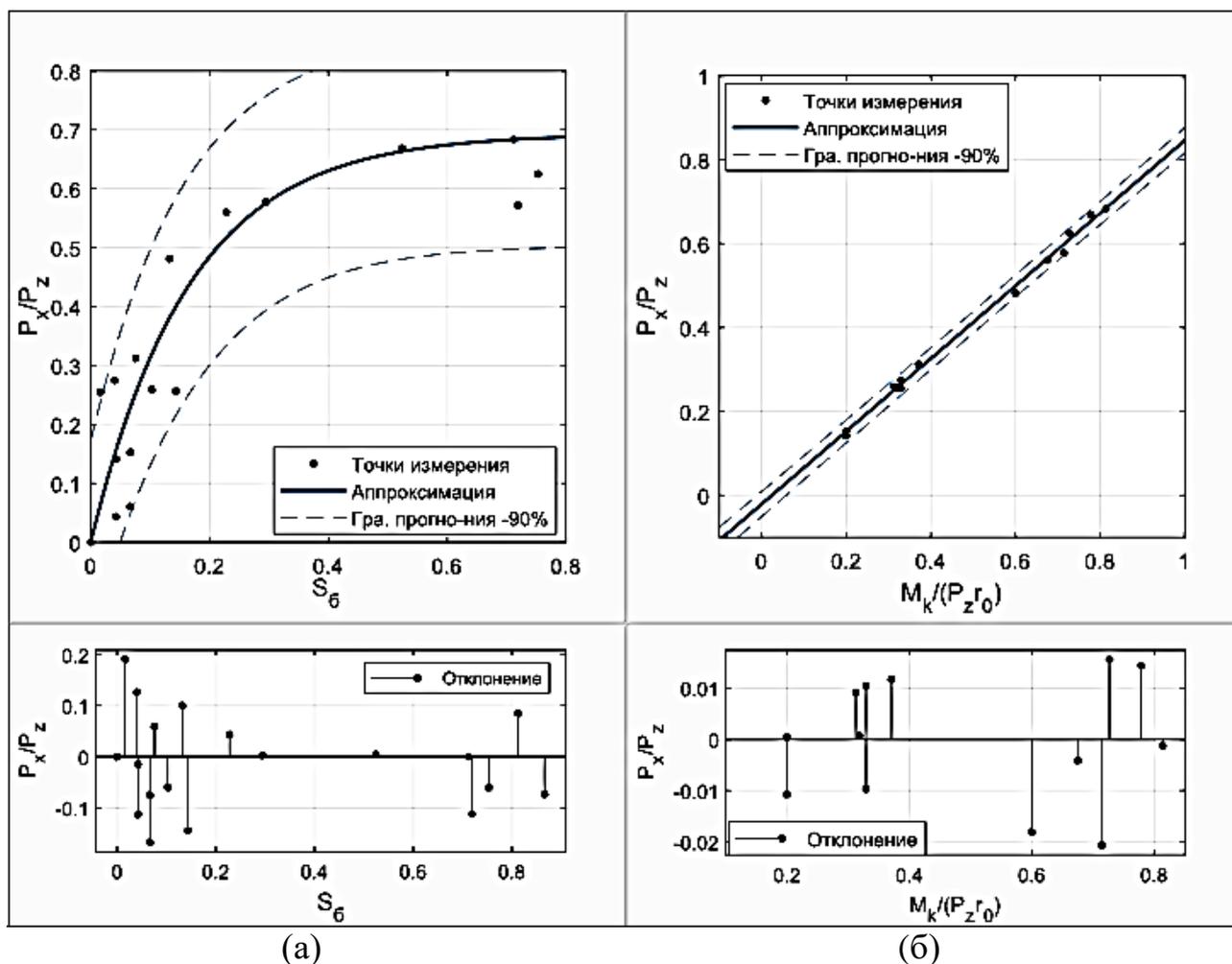


Рис. 4. Зависимость удельной силы тяги от коэффициента буксования (а) и зависимость удельной силы тяги от удельной окружной силы (б) при движении по асфальтобетонной опорной поверхности

На основании результатов, представленных на Рис. 4, получена следующая функция связи удельной силы тяги с удельной окружной силой (движение по асфальтобетонной поверхности):

$$\frac{P_x}{P_z} = 0,8665 \frac{M_k}{r_0 P_z} - 0,0206.$$

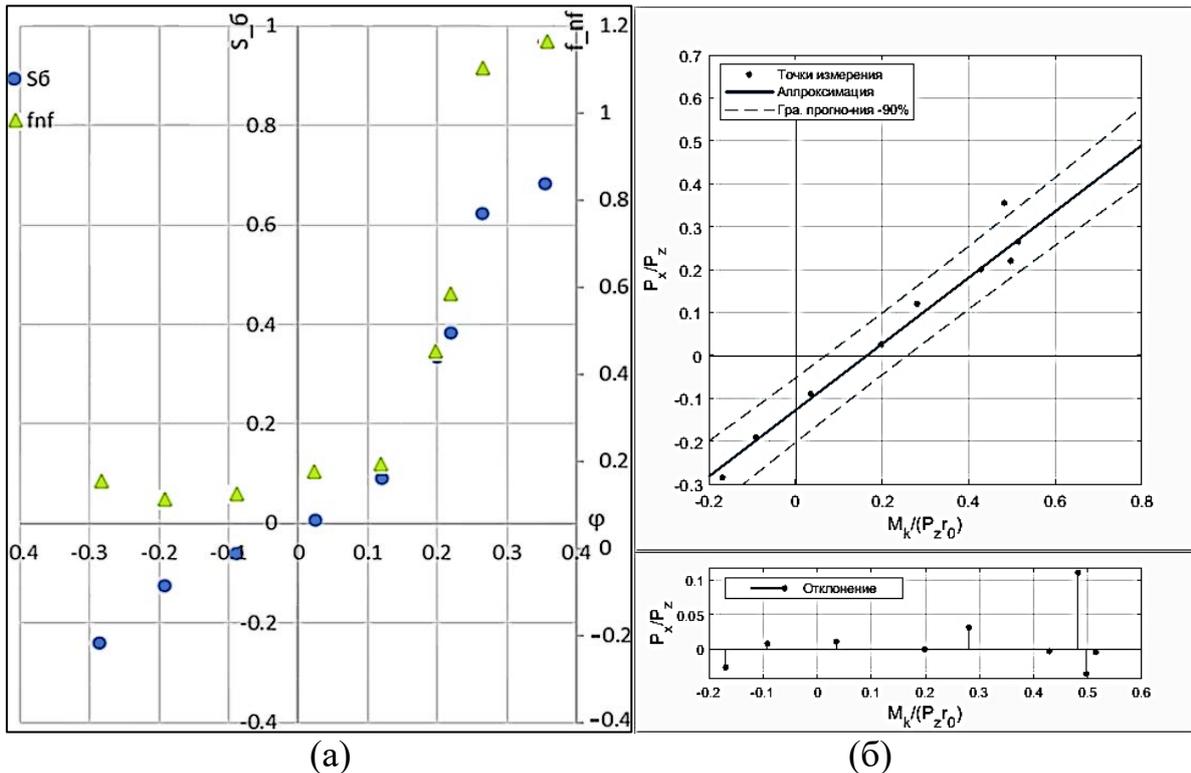


Рис. 5. Тягово-энергетическая и тягово-сцепная характеристики (а) и зависимость удельной силы тяги от удельной окружной силы (б) при движении штатного колеса лунохода (ШК) по деформируемой опорной поверхности (аналог лунного грунта, результаты эксперимента заимствованы из работ Рождественского Ю.Л.)

На основании результатов, представленных на Рис. 5, получена следующая функция связи удельной силы тяги с удельной окружной силой (движение по аналогу лунного грунта):

$$\frac{P_x}{P_z} = 0,7726 \frac{M_k}{r_0 P_z} - 0,1283.$$

Таким образом, на основании представленных результатов можно заключить, что зависимость удельной силы тяги от удельной окружной силы в определённом интервале близка к линейной.

Также в главе делается предположение что, на основании силовых факторов, действующих на оси колеса, возможно определить его буксование. Так, при известных характеристиках взаимодействия движителя с опорным основанием коэффициент буксования предлагается определять по следующему соотношению:

$$S = -S_0 \cdot \ln \left( 1 - \frac{P_x}{P_z \varphi_{\max}} \right), \quad (3)$$

где  $\varphi_{\max}$  - максимальный коэффициент взаимодействия движителя с опорным основанием (коэффициент сцепления);  $S_0$  - коэффициент, характеризующий наклон  $\varphi(s)$  в окрестности 0.

Указанные коэффициенты определяются путем аппроксимации результатов натуральных экспериментов на стенде «Грунтовой канал». Так, используя

результаты эксперимента, представленные на Рис. 4, можно получить следующие значения  $S_0 = 0,21$  и  $\varphi_{\max} = 0,663$ . Тогда для каждого заезда на основе данных о силах на оси колеса можно рассчитать коэффициент буксования. На Рис. 6 для каждого заезда представлено сравнение коэффициентов буксования, рассчитанных на основании кинематических параметров качения колеса (синяя пунктирная линия), по отношению к представленному подходу (черная линия).

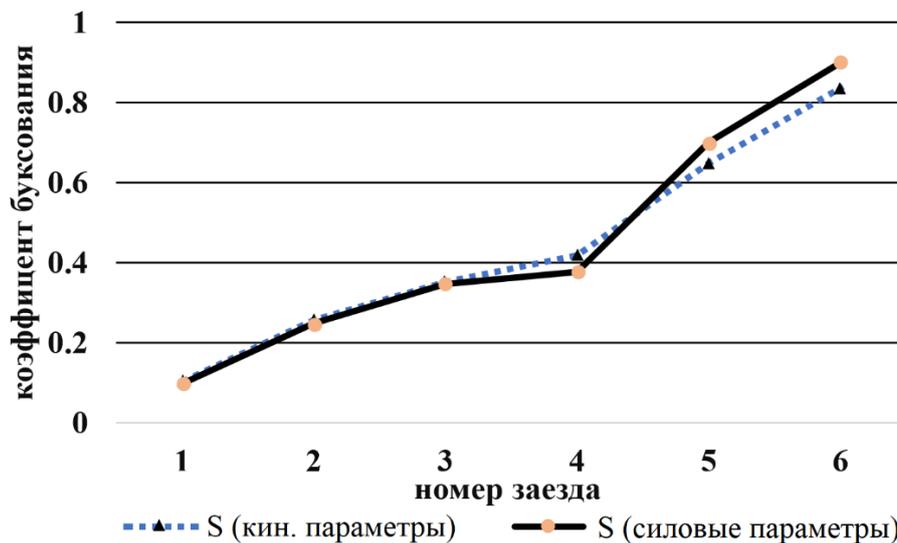


Рис. 6. Сравнение коэффициентов буксования, рассчитанных на основании кинематических и силовых параметров качения колеса

По представленным результатам можно заключить, что отклонение значения коэффициента буксования, рассчитанного на основании силовых факторов, реализуемых на оси колеса, от коэффициента буксования, рассчитанного на основе кинематических параметров качения, не превышает 10%.

**В третьей главе** приведено описание экспериментального макета с индивидуальным приводом и колесной формулой 8x8, а также представлена созданная математическая модель прямолинейного движения макета для сравнения и анализа законов управления распределением потоков мощности.

Конструктивная схема макета представлена на Рис. 7, а общий вид платформы представлен на Рис. 8.

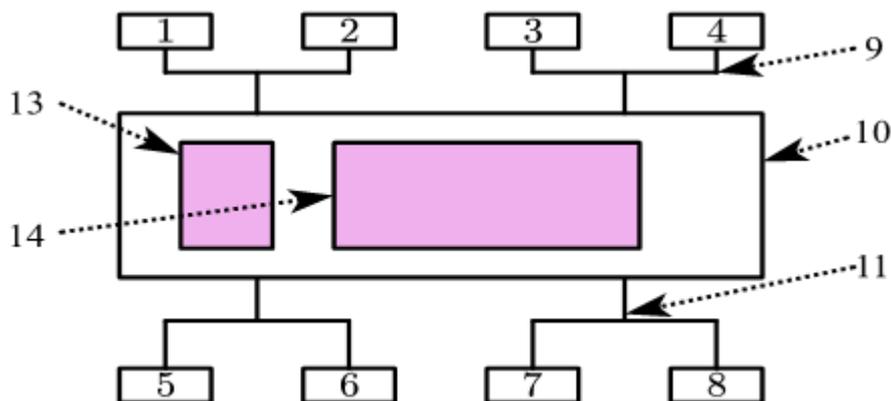


Рис. 7. Структурная схема макета

На Рис. 7 приняты следующие обозначения 1 – 8 – это 8 колес, оснащенных индивидуальными моторами. Каждая пара колес закреплена на своем балансире

9 с равными плечами, таким образом, обеспечивается равенство нормальных нагрузок на колесах. Балансир 9 закреплен на чувствительном элементе 11 с помощью подшипника, что обеспечивает свободное вращение балансира. Чувствительный элемент 11 закреплен на раме 10 платформы. 13, 14 – это блоки питания и электроники, составляющие систему управления, соответственно.

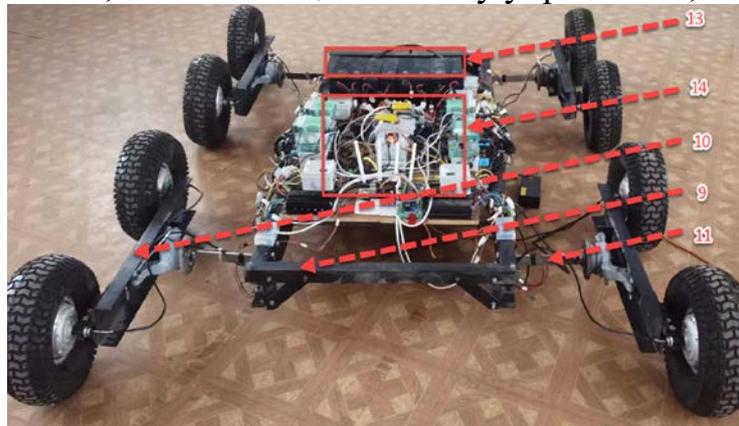


Рис. 8. Общий вид платформы, обозначения соответствуют Рис. 7

На платформе расположены четыре чувствительных элемента (Рис. 9.) с тензометрическими датчиками, которые калибруются перед сборкой в соответствии с разработанными условиями фиксации и условиями приложения нагрузки. С помощью этих элементов оценивается продольная и вертикальная сила на осях балансиров.

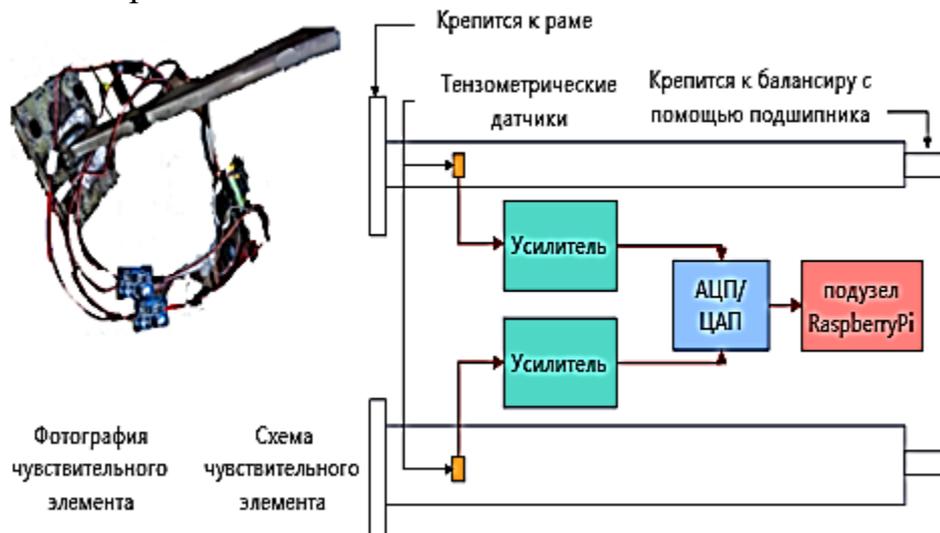


Рис. 9. Фотография и структурная схема чувствительного элемента

В рамках модели динамики, представленной в главе, рассматривается только прямолинейное движение планетохода, так как предполагается, что движение по поверхности планет целесообразно разделять на две составляющие: выбор направления движения за счет бортового поворота и прямолинейное движение в выбранном направлении до заданной точки. Затем цикл повторяется.

В связи с этим математическая модель базируется на ряде допущений, основными из которых являются:

1. Модель описывает только прямолинейное движение планетохода по опорной поверхности;

2. Балансир равномерно распределяет вертикальную нагрузку между передним и задним колесом, а моменты сопротивления переднего и заднего колес каждого балансира одинаковы;

3. Планетоход оснащен балансирами, связывающими два соседних колеса каждого борта с целью обеспечения равенства нормальных нагрузок. Кроме того, система управления планетоходом построена таким образом, что угловые скорости колес, соединенных балансиrom, поддерживаются одинаковыми. В связи с этим для упрощения математической модели каждый балансир и связанные с ним колеса планетохода заменяются одним колесом с соответствующей нормальной нагрузкой и подводимым крутящим моментом.

Расчетная схема движения планетохода с учетом принятых допущений представлена на Рис. 10.

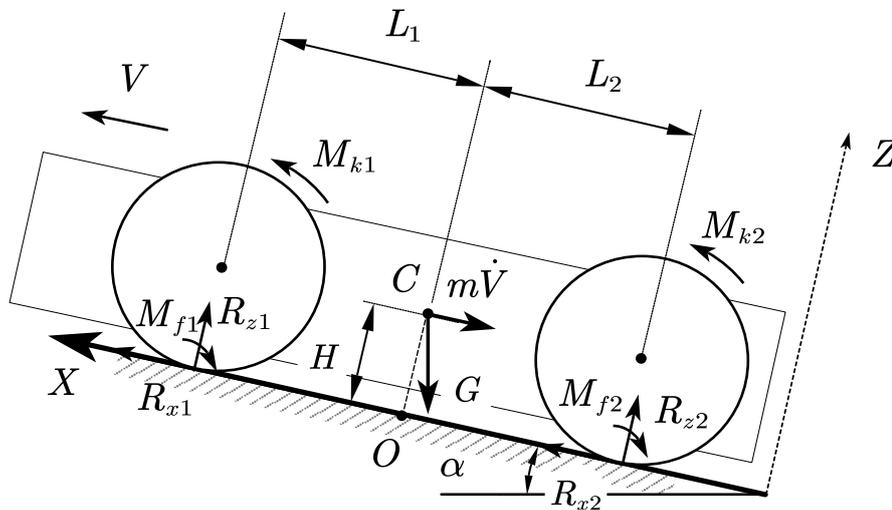


Рис. 10. Расчетная схема движения макета планетохода

В соответствии с расчетной схемой составлены следующие уравнения, позволяющие описывать движение планетохода;

$$\begin{aligned}
 m\dot{V} &= \sum_i^n R_{xi} - mg \sin \alpha; \\
 J_k \dot{\omega}_{ki} &= M_{ki} - M_{ki}^f; \\
 2R_{z1}L_1 - 2R_{z2}L_2 + m\dot{V}H + mg \sin(\alpha)H + \sum_{i=1}^n M_{fi} &= 0; \\
 2R_{z1} + 2R_{z2} &= mg \cos(\alpha),
 \end{aligned} \tag{4}$$

где  $i = 1..4$ ;  $m$  - масса планетохода;  $\dot{V}$  - ускорение центра масса планетохода;  $J_k$  - момент инерции колеса;  $\dot{\omega}_{ki}$  - угловое ускорение  $i$ -ого колеса;  $R_{xi}$  - продольная реакция в пятне контакта  $i$ -ого колеса с опорной поверхностью;  $R_{zi}$  - нормальная реакция в пятне контакта  $i$ -ого колеса с опорной поверхностью;  $M_{ki}$  - крутящий момент на  $i$ -ом колесе;  $M_{ki}^f$  - момент взаимодействия  $i$ -ого колеса с опорным основанием;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\alpha$  - угол наклона опорной поверхности;  $H$  - высота центра масс;  $M_{fi}$  - момент сопротивления качению  $i$ -ого колеса ( $M_{fi} = fR_{zi}r_0$ ).

Для математического описания электродвигателя каждого  $i$ -ого колеса используется следующая система уравнений:

$$M_{Ti}(\omega_{ki}, h_i) = \begin{cases} h_i \cdot N_{max} / \omega_{ki} & M_{max} \cdot \omega_{ki} > N_{max} \\ h_i \cdot M_{max} & M_{max} \cdot \omega_{ki} \leq N_{max} \\ 0 & \omega_{ki} > \omega_{max} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $M_{Ti}$  - крутящий момент, создаваемый мотором;  $N_{max}$  - максимальная выходная мощность мотора;  $M_{max}$  - максимальный выходной крутящий момент мотора;  $\omega_{max}$  - максимальная угловая скорость мотора;  $h_i$  - параметр управления мотором (степень использования мощности). Этот параметр изменяется от 0 до 1;

Для описания взаимодействия колес с опорным основанием используются следующие аппроксимирующие зависимости:

$$R_x / R_z = \varphi = \text{Sign}(S_{\bar{\sigma}}) \varphi_{max} \left( 1 - e^{-\frac{|S_{\bar{\sigma}}|}{S_0}} \right); \quad (6)$$

$$M_k^f = (\varphi(S_{\bar{\sigma}}) + f) \cdot r_0 R_z, \quad (7)$$

где  $f$  - коэффициент сопротивления качению колеса;  $r_0$  - радиус качения колеса без скольжения;

Для описания индивидуального привода ведущих колес используется следующий набор уравнений для каждого из них:

$$J_k \dot{\omega}_{ki} = M_{Ti}(h_i, \omega_{ki}) - M_{ki}^f. \quad (8)$$

Представленная математическая модель реализована в программном комплексе «Matlab/ Simulink».

Для верификации разработанной математической модели планетохода было проведено сравнение результатов моделирования с результатами натурального эксперимента. Сравнение проводилось на основании маневра разгона планетохода по оценке линейной скорости машины на основании угловых скоростей вращения колес. Результат сравнения представлен на Рис. 11.

В результате натурального эксперимента установлено, что отклонение результатов моделирования от результатов натурального эксперимента не превышает 12 %.

Таким образом, можно заключить, что математическая модель обладает достаточной точностью для проведения виртуальных экспериментов по исследованию и оценке эффективности разрабатываемого закона распределения мощности между колесами планетохода.

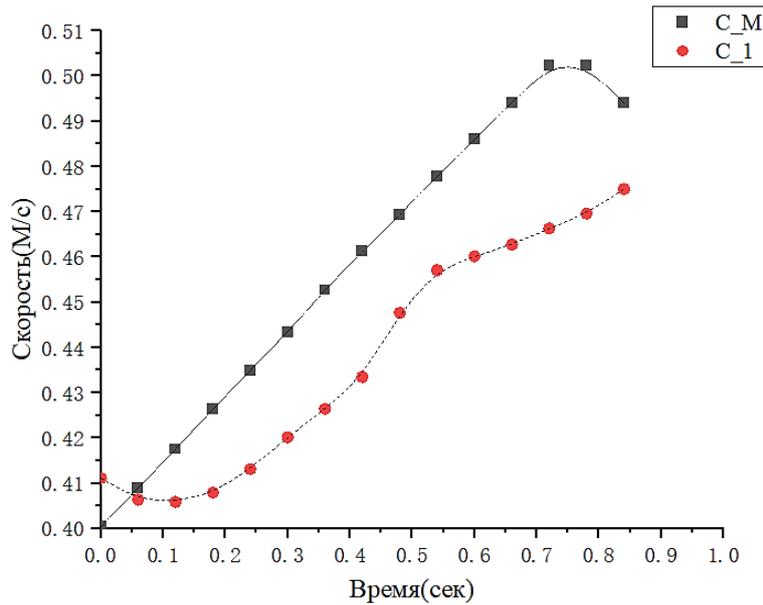


Рис. 11. Изменение оценки линейной скорости планетохода (на основании угловых скоростей вращения колес) полученной при натурном эксперименте (C\_1) и в рамках математического моделирования (C\_M)

В четвертой главе представлен разработанный закон распределения мощности по колесам для планетохода с индивидуальным приводом движителей при прямолинейном движении.

Для определения оптимальных коэффициентов буксования каждого колеса, позволяющих минимизировать энергетические затраты планетохода при прямолинейном движении, проводится оптимизация: определяются такие коэффициенты буксования каждого колеса планетохода, при которых реализуется минимальное значения коэффициента удельных потерь мощности  $f_{Nf}$  с учетом ограничения типа равенство, накладываемого на требуемую тяговую силу  $P_{кр}$ .

$$\begin{cases} \min(f_{Nf}) = \min\left(\frac{\sum_{i=1}^n M_{ki}\omega_i - \sum_{i=1}^n P_{xi}v}{Gv \cos(\alpha)}\right) \\ \sum_{i=1}^n P_{xi} = G \sin(\alpha) + P_{кр} \end{cases}, \quad (9)$$

Для получения аналитического решения принято допущение, что при малых  $S \in [0, S_0]$  связь коэффициента продольной силы тяги с коэффициентом буксования линейна:

$$\varphi = \varphi_{max} \left(1 - e^{\frac{S_0}{S}}\right) \rightarrow \varphi \approx \varphi_{max} \frac{S_0}{S} \quad (10)$$

Решение задачи оптимизации проводится методом множителей Лагранжа. Для этого система уравнений (9) приводится к следующему виду:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_{Nf}}{\partial S_i} - \lambda \frac{\partial \psi}{\partial S_i} = 0 \\ \psi = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

где  $\Psi = \sin(\alpha) + k_{kp} - \sum_{i=1}^n P_{xi} / G$ ;

$\lambda$  – неопределённый множитель Лагранжа.

Разрешая представленную систему уравнений относительно коэффициентов буксования, получим:

$$S_i = 1 - \sqrt{\frac{f_i S_{0i}}{\varphi_{\max i}} + 1} \cdot \frac{-\sin(\alpha) - k_{kp} + \sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{\varphi_{\max i}}{S_{0i}}}{\sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{\varphi_{\max i}}{S_{0i}} \left( \sqrt{\frac{f_i S_{0i}}{\varphi_{\max i}} + 1} \right)}, \quad (12)$$

где  $\gamma_i = R_{zi} / G$ ,  $k_{kp} = P_{kp} / G$ .

В случае, если расчетное значение буксования превышает предельную величину его необходимо ограничить  $S_j = [S_j]$ , и значения требуемых коэффициентов буксования перераспределить между остальными колесами. Превышение буксования опасно возникновением экскавационного эффекта, в ходе которого колесо больше погружается в грунт (закапывается), в следствии чего возрастает коэффициент сопротивления качению колесного движителя, что может привести к потере проходимости планетохода. С учетом представленного условия уравнение (12) можно привести к следующему виду:

$$S_i = 1 - \sqrt{\frac{f_i S_{0i}}{\varphi_{\max i}} + 1} \cdot \frac{-\sin(\alpha) - k_{kp} + \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i \frac{\varphi_{\max i}}{S_{0i}} + \frac{\varphi_{\max j}}{S_{0j}} \gamma_j S_j}{\sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i \frac{\varphi_{\max i}}{S_{0i}} \left( \sqrt{\frac{f_i S_{0i}}{\varphi_{\max i}} + 1} \right)} \quad (13)$$

Таким образом, используя уравнения (12) или (13) можно определять желаемые коэффициенты буксования каждого колеса планетохода, обеспечивающие минимум потерь энергии на движения с учетом сохранения коэффициентов буксования в допустимых пределах и в дальнейшем реализовывать их системой управления на основе принципа обратной связи при помощи оценки текущего буксования каждого колеса по формуле (3).

В случае, если требуемые значения коэффициентов буксования всех колес планетохода достигнут предельного значения, система управления трансмиссией должна сформировать сигнал о том, что в интересах безопасности планетохода двигаться дальше в этом направлении не рекомендуется.

Для оценки эффективности разработанного закона распределения мощности между колесами планетохода применена представленная в главе 3 математическая модель динамики. С ее помощью проводится сравнение мощности, затраченной на движение машины, с результатами полученными для планетохода оснащенного блокированной трансмиссией.

В рамках сравнительных испытаний проводится имитация прямолинейного движения планетохода с заданной скоростью (3 м/с) по опорной поверхности для которой известны  $\varphi_{\max}$ ,  $f_i$  и  $S_0$ .

Кроме того, с целью подтверждения оптимальности полученного закона управления распределением мощности математическая модель планетохода, оснащенного индивидуальным приводом колес, дополнена алгоритмом численной оптимизации. Применение численной оптимизации позволит полноценно учесть зависимость удельной силы тяги от буксования, не прибегая к ее линейной аппроксимации.

Результаты сравнительных испытаний представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Результаты сравнительных испытаний

Название	Аналит. закон	Численная оптимизация	Блок. привод
Угол подъёма, рад	0,157 (9 градусов)		
Целевая скорость, м/с	3		
Коэффициент сопротивление качению колес передней / задней оси	0,3 / 0,1		
Коэффициент сцепления $\varphi_{max}$	0,38		
Коэффициент буксования ( $S_6$ ) колес передней оси	0,0290	0,0295	0,0410
Коэффициент буксования ( $S_6$ ) колес задней оси	0,0475	0,0473	0,0410
Суммарная затраченная мощность, Вт	2155,940	2155,935	2158,670

На основании полученных данных можно заключить, что мощность, затраченная на движение, в случае использованная разработанного аналитического закона, и полученная с помощью численной оптимизации, совпадают и составляют 2155,9 Вт. Мощность, затрачиваемая на движения в случае заблокированного привода, составляет 2158,7 Вт.

Таким образом, доказана возможность корректного использования в рамках разработанного закона линейной аппроксимации  $\varphi = \varphi_{max} S_6/S_0$  при малых  $S \in [0, S_0]$ . Кроме того установлено, что потребление энергии в случае применения разработанного закона может быть незначительно снижено по сравнению с заблокированной трансмиссией. В связи с этим основное преимущество указанного закона заключается в возможности ограничения буксования движителей на основании данных о силовых факторах, реализуемых на его оси, что позволит не допустить интенсивного экскавационного эффекта и, как следствие, «закапывание» колес и потери проходимости планетохода.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На модернизированном стенде «Грунтовой канал» и с использованием математической модели качения колеса в условиях стенда получены тягово-сцепные и тягово-энергетические зависимости для описания взаимодействия конкретного типа колесного движителя с разными поверхностями движения. Эти

зависимости использованы при разработке макета планетохода с колесной формулой 8x8.

2. На основе экспериментальных данных была подтверждена гипотеза о линейной зависимости между удельной силой тяги и удельной окружной силой при качении деформируемого колеса по деформируемому опорному основанию. Линейный характер зависимости был подтвержден теоретическими расчетами в сочетании с экспериментальными данными, и литературными источниками. Это позволяет обоснованно использовать линейную аппроксимацию экспериментальных данных при моделировании движения планетохода.

3. На основании экспериментальных данных, полученных в рамках стенда «Грунтовой канал», доказана возможность оценки буксования движителя на основании силовых факторов, реализуемых на его оси, в случае если известны характеристики взаимодействия с опорным основанием. Погрешность оценки коэффициента буксования в этом случае не превышает 10 %.

4. Разработан макет планетохода с индивидуальным приводом и колесной формулой 8x8 с использованием современного открытого аппаратного обеспечения, который позволяет исследовать различные законы распределения мощности между колесами.

5. Разработана математическая модель макета, которая дополнена моделью системы управления, организующей распределение мощности между колесами. Разработанная математическая модель была верифицирована, отклонение экспериментальных данных от результатов, получаемых в рамках математического моделирования, не превышает 12 %.

6. Разработан закон управления распределением мощности между колесами планетохода для повышения его энергоэффективности и проходимости. Подтверждена возможность корректного использования в рамках разработанного закона линейной аппроксимации  $\varphi = \varphi_{max} S_6/S_0$  при малых  $S \in [0, S_0]$ .

7. Проведена оценка эффективности разработанного закона распределения мощности между колёсами. Результаты математического моделирования показывают, что потребление энергии может быть незначительно снижено по сравнению с заблокированной схемой трансмиссии за счет минимизации потери мощности при качении колес.

8. Основное преимущество разработанного закона заключается в возможности ограничения буксования движителей на основании данных о силовых факторах, реализуемых на его оси, что позволит не допустить интенсивного экскавационного эффекта и, как следствие, «закапывание» колес и потери проходимости планетохода.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Косицын Б. Б., Чжэн Х., Газизуллин Р. Л., Модернизация управляющей и измерительной систем стенда «Грунтовый канал» и разработка математической модели движения колеса в условиях стенда // Труды НАМИ. 2021. №1 (284). С. 25 – 34. (1,0 п.л / 0,5 п.л.);

2. Газизуллин Р.Л., Чжэн Х., Котиев Г.О., Косицын Б.Б. Метод управления буксованием колесного движителя автомобиля и трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2021. №6 (88). С. 29 – 44. (1,6 п.л / 0,6 п.л.).