

На правах рукописи

УДК 629.33

Назаренко Сергей Владимирович

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТРАНСМИССИЕЙ БЕСПИЛОТНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ ПРИ
ЦИКЛИЧНЫХ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАХ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Набережные Челны – 2024

Работа выполнена на кафедре автомобилей, автомобильных двигателей и дизайна Набережночелнинского института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Научный руководитель: **Косицын Борис Борисович**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Колесные машины» МГТУ им.
Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Шадрин Сергей Сергеевич**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Автомобили» МАДИ

Тумасов Антон Владимирович
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Автомобили и тракторы» НГТУ

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»

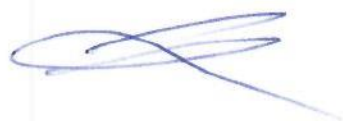
Защита состоится «25» декабря 2024 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.13 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. 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.

Автореферат разослан «___» _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Косицын Б.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном мире большинство стран и автопроизводителей прилагают серьезные усилия, направленные на развитие беспилотных транспортных средств, которые должны обеспечивать наилучшую производительность в цифровой среде современных городов – способствовать увеличению безопасности движения и пропускной способности дорог.

Наибольший прогресс внедрения беспилотных транспортных машин наблюдается в отраслях, где подразумевается их эксплуатация в специально подготовленной среде, например, при внутрипроизводственных перевозках (перевозки в масштабах склада, терминала, промышленного предприятия).

Подобная эксплуатация транспортных машин делает их маршрут цикличным (повторяющимися), а их самих – участниками производственного процесса. Это с одной стороны требует для каждого маршрута жестко определить время в пути и, по возможности, снизить затраты на передвижение, а с другой стороны, определённость среды и режима эксплуатации позволяет заранее спланировать и оптимизировать маршрут.

Необходимость движения в стесненных условиях (и, возможно, в закрытых помещениях) требует высокой маневренности, возможности получения малых скоростей движения и отсутствия вредных выбросов, что делает желательным применение в машине тягового электропривода. При этом современное развитие беспилотных транспортных средств, их органов технического зрения и систем управления, позволяет перемещаться не только на производственных площадках, но также и между промышленными объектами, в том числе по дорогам общего пользования. Это диктует для беспилотной колесной машины (КМ) повышенные требования к подвижности и, соответственно, к диапазону работы электропривода.

Таким образом, исследование, направленное на определение оптимального с точки зрения энергоэффективности закона движения беспилотной КМ, совершающей цикличные грузоперевозки по заданному маршруту, является актуальным.

Целью работы является повышение энергоэффективности циклических грузоперевозок путем выбора рациональных параметров и закона управления тяговым приводом беспилотных колесных машин, оснащенных электромеханическими трансмиссиями.

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

- разработан метод определения закона оптимального управления тяговыми электродвигателями беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках;
- разработана математическая модель криволинейного движения колесной машины, пригодная для решения задачи оптимизации закона движения по заданной траектории, исходя из критерия энергоэффективности;
- разработана методика и проведены экспериментальные исследования с целью получения расчетно-экспериментальных зависимостей для оценки повышения сопротивления при криволинейном движении колесной машины;
- разработан метод определения рациональных параметров электромеханической трансмиссии колесной машины, имеющей в составе привода два тяговых электродвигателя, работающих в разных скоростных диапазонах;

- определен закон оптимального управления электроприводом беспилотной колесной машины с учетом ограничений, вызванных конструктивными особенностями трансмиссии и требованиями к режиму движения на участках заданного маршрута. На основании указанного закона проведена оценка энергоэффективности применения в составе привода колесной машины двух тяговых электродвигателей, работающих в разных скоростных диапазонах.

Научная новизна работы:

- разработан метод определения закона оптимального управления тяговым электроприводом беспилотной колесной машины, отличающийся возможностью формирования закона управления в случае наличия нескольких тяговых электродвигателей в составе трансмиссии, работающих в разных скоростных диапазонах;

- разработана математическая модель криволинейного движения колесной машины, отличающаяся применением расчетно-экспериментальных зависимостей для учета повышения сопротивления при изменении направления движения;

- разработан метод определения рациональных параметров электромеханической трансмиссии колесной машины, отличающийся применением в составе привода двух и более тяговых электродвигателей, работающих в разных скоростных диапазонах.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается:

- использованием обоснованных аналитических выражений классической теории движения колесных машин;

- использованием экспериментальных данных, а именно расчетно-экспериментальных зависимостей для оценки повышения сопротивления при криволинейном движении колесной машины.

Практическая ценность:

- разработано программное обеспечение для определения оптимального скоростного режима и закона управления тяговым электроприводом беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках с учетом ограничений, вызванных конструктивными особенностями трансмиссии и требованиями к режиму движения на участках заданного маршрута для использования на предприятиях транспортного машиностроения;

- сформированы практические рекомендации по определению параметров тяговых электромашин беспилотной колесной машины, работающих в разных скоростных диапазонах, для использования на предприятиях транспортного машиностроения.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке студентов на кафедре автомобилей, автомобильных двигателей и дизайна Набережночелнинского института КФУ, а также внедрены в ПАО «КАМАЗ», что подтверждается соответствующими актами.

На защиту выносятся положения научной новизны, выводы и результаты исследований:

- метод определения закона оптимального управления тяговым электроприводом беспилотной колесной машины;

- метод определения рациональных параметров электромеханической трансмиссии колесной машины, отличающийся применением в составе привода

двух и более тяговых электродвигателей, работающих в разных скоростных диапазонах;

- математическая модель криволинейного движения колесной машины, пригодная для решения задачи оптимизации закона движения по заданной траектории, исходя из критерия энергоэффективности;

- полученный закон оптимального управления электроприводом беспилотной колесной машины с учетом ограничений, вызванных конструктивными особенностями трансмиссии и требованиями к режиму движения на участках заданного маршрута.

Личный вклад автора состоит в том, что представленные результаты получены автором или при его непосредственном участии. Автором лично разработана принципиальная схема трансмиссии беспилотной колесной машины, оснащенной двумя тяговыми электродвигателями, работающими в различных скоростных диапазонах, подход к оптимизации закона управления ее приводом, математическая модель, применяемая для оптимизации. Автор непосредственно участвовал в организации и проведении экспериментальных исследований и последующей обработке данных.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на: научном семинаре кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2024 г.); научном семинаре кафедры автомобилей, автомобильных двигателей и дизайна Набережночелнинского института КФУ (Набережные Челны, 2024 г.); конференции E3S Web of Conferences «Ensuring Energy Efficiency and Safety of the Cyclic Operation of the Mining Dump Truck» (Кемерово, 2020 г.); Международном автомобильном научном форуме МАНФ-2020 «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы» (Москва, 2020 г.). XVI-ой всероссийской мультikonференции по проблемам управления МКПУ-2023 (Волгоград, 2023 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ общим объемом 4,2 п.л., из них по списку, рекомендованному ВАК РФ, 4 (3 по заявленной научной специальности), индексируемых в международной базе научных изданий Scopus 1.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, а также списка литературы. Работа выполнена на 127 листах машинописного текста, включает 78 рисунков и 9 таблиц. Список литературы насчитывает 82 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность развития беспилотных колесных машин, предназначенных для циклических грузоперевозок на технологических объектах и между ними. Сформулированы цель, задачи, а также научная новизна работы.

В Главе 1 диссертации проведен анализ современных подходов к решению транспортных задач, с учетом возрастания роли электронной инфраструктуры городов и предприятий (Рис.1). Рассмотрены научные работы, посвященные различным аспектам увеличения эффективности перевозок – решению логистических задач, оптимизации маршрутов и режимов движения, совершенствованию самих транспортных средств.

Рассмотрены математические модели движения колесных транспортных машин в контексте возможности их применения совместно с методами оптимизации. Проанализированы методы поиска оптимальных процессов, пригодные для применения в настоящей работе. Приведены основные подходы к моделированию дорожных условий, а также отдельных агрегатов и систем транспортных машин.



Рис.1. Общий вид беспилотной транспортной платформы (концепт проект)

В области моделирования движения транспортных средств и поиска оптимальных процессов особенно отмечены работы ученых: Чудакова Е.А., Певзнера Я.М., Антонова Д.А., Дика А.Б., Смирнова Г.А., Попова С.Д., Ларина В.В., Рождественского Ю.Л., Литвинова А.С, Фаробина Я.Е., Косицына Б.Б., Горелова В.А., Котиева Г.О., Стадухина А.А., Иванова А.М., Бахмутова С.В., Кравца В.Н., Беллмана Р., Понтрягина Л.С., Болтянского В.Г., Janosi Z., Hanamoto B., Pasejka H.B., а также труды научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, МАДИ, МАМИ, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Академии БТВ, 21 НИИИ МО РФ и др.

Имеющийся опыт разработки быстроходных транспортных машин с тяговым электроприводом показывает необходимость применения двух или более механических диапазонов. То есть, в составе трансмиссии требуется применять коробку передач. Это, в некотором смысле, обесценивает часть преимуществ применения тягового электропривода, в частности затрудняет обеспечение бесступенчатого разгона (и требует автоматизации переключения передач).

В качестве решения указанной инженерной проблемы предлагается использование в составе беспилотной КМ двух тяговых электромашин, одна из которых предназначена для обеспечения высокой скорости движения – быстроходный привод (БП), а вторая позволяет преодолевать повышенное сопротивление движению – моментный привод (МП). Для этого целесообразно использовать одинаковые электромашины, но в совокупности с редукторами, имеющими разное фиксированное передаточное отношение (Рис. 3).

В данном исследовании в целях проведения сравнительной оценки предлагаемого варианта КМ с двумя тяговыми электродвигателями (Рис. 3) сформирован вариант машины с одним тяговым электродвигателем, который должен обеспечить аналогичный диапазон движения КМ (Рис.2).

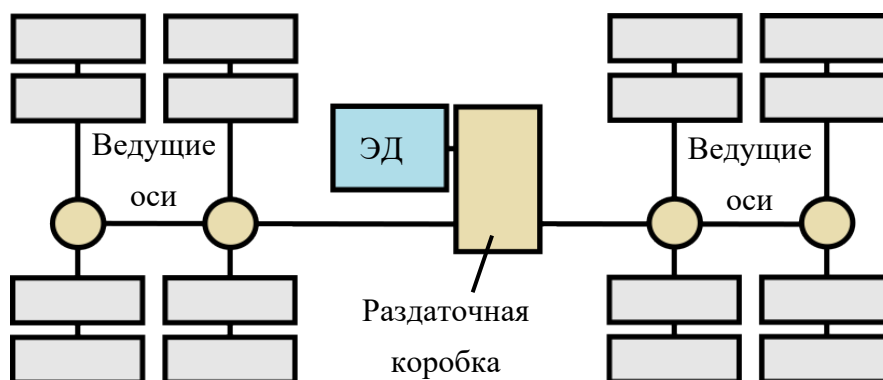


Рис.2. Принципиальная схема трансмиссии беспилотной колесной машины с одним тяговым электродвигателем (вариант I)

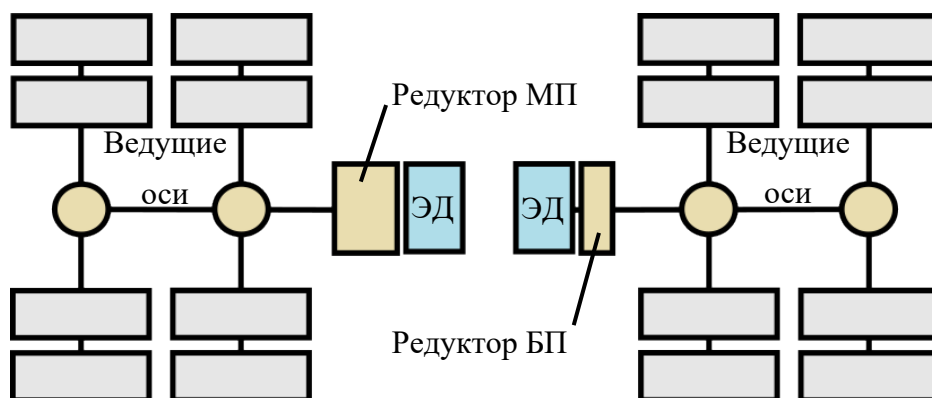


Рис. 3. Принципиальная схема трансмиссии беспилотной колесной машины с двумя тяговыми электродвигателями (вариант II)

Для оценки потерь на преобразование энергии в электродвигателях в работе используется аппроксимирующая зависимость, которая была получена путем обработки характеристик ряда существующих электродвигателей. Как видно на Рис. 4, эффективность работы электродвигателя зависит как от частоты вращения ротора, так и от развиваемого крутящего момента.

На графике маркерами отмечены режимы работы электродвигателя при движении КМ со скоростью 10 км/ч и коэффициенте сопротивления 0,1, в случае обеспечения тяги только моментным приводом, или только быстроходным приводом. Видно, что в первом случае КПД электромашины более 0,92, а во втором менее 0,85 (параметры машины представлены в Главе 5). Таким образом, наличие двух электромашин в совокупности с редукторами, имеющими различные передаточные отношения, позволяет перераспределять тягу между ними так, чтобы суммарные потери энергии при движении машины были минимальны.

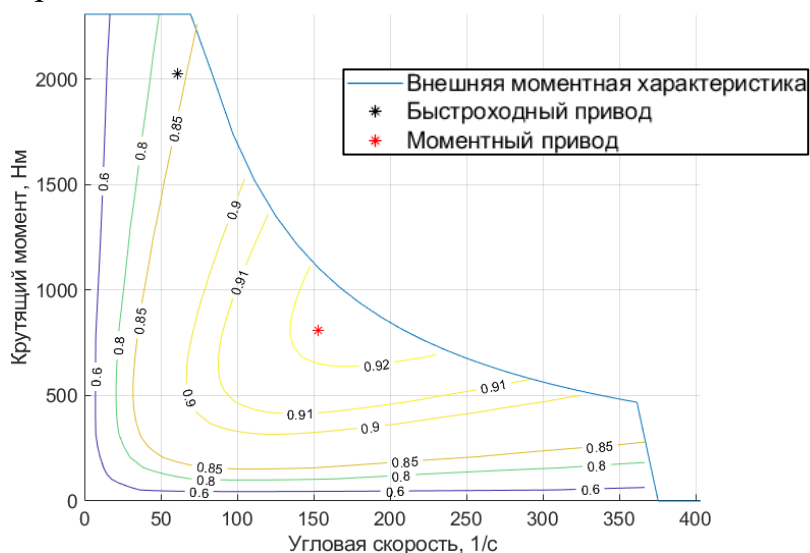


Рис. 4. Моментная скоростная характеристика электродвигателя с обозначением областей КПД (контурными линиями)

В конце Главы 1 сформулированы основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели работы.

В Главе 2 представлена математическая модель криволинейного движения беспилотной колесной машины, записанная в естественных координатах и пригодная для решения задачи оптимизации:

$$(\delta m + J_z k_k^2) \ddot{s} + J_z (\partial k_k / \partial s) v^2 \cdot k_k = P_t - mg(f_{\text{крив}} \cos(\alpha_k) + \sin(\alpha_k)) - P_w, \quad (1)$$

где δ – коэффициент учета вращающихся масс; m – масса КМ; J_z – момент инерции КМ относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс; k_k – кривизна траектории движения как функция от пути s ; v – скорость движения машины; P_t – окружная сила тяги, реализуемая на колесах КМ; g – ускорение свободного падения; $f_{\text{крив}}$ – коэффициент сопротивления с учетом движения КМ по криволинейной траектории; α_k – угол наклона опорной поверхности в продольном направлении; P_w – сила аэродинамического сопротивления.

Коэффициент $f_{\text{крив}}$ описывает внешнее сопротивление с учетом скоростных потерь и потерь, вызванных криволинейным движением машины. В Главе 2 работы для учета этого фактора предложена следующая зависимость:

$$f_{\text{крив}} = f_{\text{гр}}(1 + k_v v^2) + v^4 k_k^2 / (g^2 \zeta_y), \quad (2)$$

где $f_{\text{гр}}$, k_v , ζ_y – коэффициенты сопротивления качению на малой скорости без увода, учета скоростных потерь, удельный коэффициент сопротивления боковому уводу.

Тем не менее далее в работе предлагается определять величину $f_{\text{крив}}$ на основе расчетно-экспериментальной зависимости, что с достаточной точностью позволит отразить потери при движении машины для оценки энергоэффективности за счет учета ряда особенностей, связанных с поворотом машины в целом.

Глава 3 посвящена описанию натурного эксперимента и расчетно-экспериментальной зависимости определения коэффициента $f_{\text{крив}}$, учитывающего повышение сопротивления при криволинейном движении КМ.

Испытания проводились на полигоне НТЦ КАМАЗ совместно со специалистами предприятия при участии представителей МГТУ им. Н.Э. Баумана. В качестве объекта испытаний использовалось шасси КАМАЗ 63934. Измерительный комплекс имел следующий состав:

- комплект тензометрических колес, предназначенный для измерения продольных P_x , поперечных P_y и вертикальных P_z усилий на оси колеса, моментов относительно указанных осей M_x, M_y, M_z , а также угловой скорости и угла поворота колеса относительно оси вращения;
- система спутниковой навигации, предназначенная для определения абсолютной скорости и траектории движения машины;
- система регистрации угла поворота рулевого колеса, а также степени нажатия на педали газа и тормоза.

В рамках испытательных заездов происходило выполнение КМ ряда маневров поворота с фиксированными радиусами (15-50 метров). Скорость при испытаниях поддерживалась постоянной. Для каждой скорости движения (5, 15, 30 км/ч) проводилось по три испытания. По результатам натурных испытаний коэффициент $f_{\text{крив}}$ определялся по следующей зависимости:

$$f_{\text{крив}} = (\sum M_y / r_0 - \sum P_x) / \sum F_z, \quad (3)$$

где $\sum M_y$ – сумма крутящих моментов, реализуемых на каждом колесе КМ;

r_0 – радиус качения колеса в свободном режиме;

$\sum P_x$ – сумма продольных сил, реализуемых на каждом колесе КМ (в проекции на продольную ось машины);

$\sum F_z$ – сумма вертикальных сил, реализуемых на каждом колесе КМ.

На Рис. 5. представлены результаты определения $f_{\text{крив}}$ на основе собранных экспериментальных данных (на графике принято обозначение – чем больше размер маркера, тем больше скорость). Здесь же показаны результаты вычислений по зависимости (2), а также графики аппроксимирующих функций, отражающих зависимость $f_{\text{крив}}$ от скорости и кривизны траектории движения КМ (4).

Применение представленных аппроксимационных зависимостей позволит существенно повысить точность моделирования движения за счет экспериментального учета ряда особенностей, связанных с поворотом машины (сопротивление повороту пятен контакта колес, особенности кинематики рулевой трапеции, сопротивление вызванное уводом колес при движении на околокритических скоростях, боковое скольжение колес неуправляемых осей), которые не отражаются зависимостью (2).

$$f_{\text{крив}}(k, v) = a(v) \cdot e^{b(v)/k} + c(v). \quad (4)$$

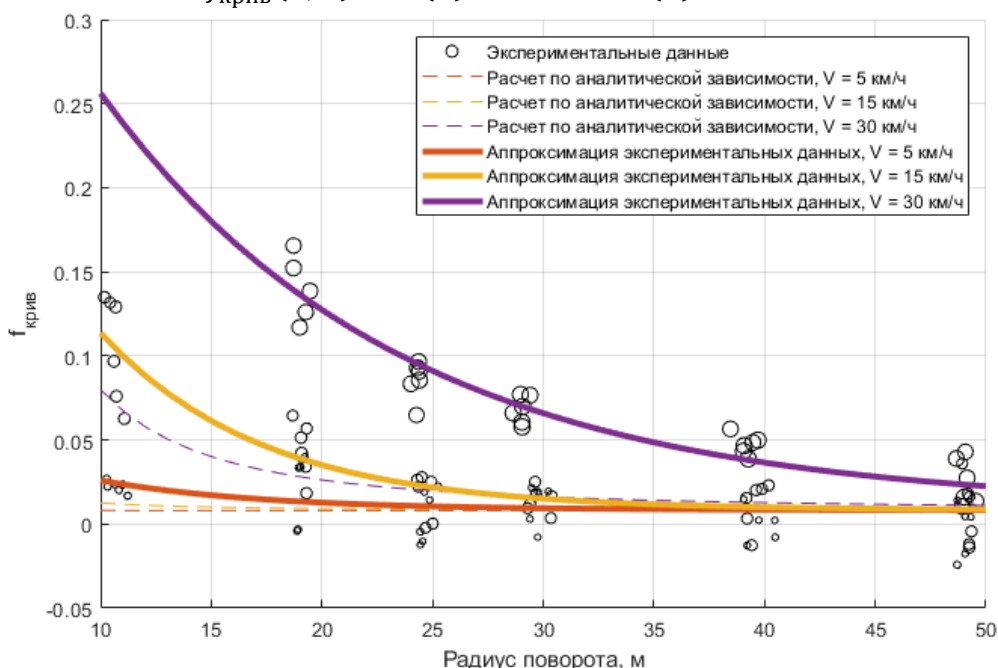


Рис. 5. Результаты экспериментального определения коэффициента сопротивления криволинейному движению автомобиля, аппроксимирующие функции, а также результаты расчета по аналитической зависимости

В Главе 4 представлен метод определения закона оптимального управления тяговым электроприводом беспилотной КМ при циклических грузоперевозках по заданному маршруту.

Дано краткое описание принципа работы генетического алгоритма, выбранного в качестве базового для решения задач данного исследования (Рис. 6). Как и в случае других алгоритмов оптимизация выполняется исходя из некоторого критерия, который описывается целевой функцией (в терминах генетического алгоритма – функции приспособленности).

Целевая функция предназначена для сравнения различных наборов варьируемых параметров оптимизируемой системы (то есть особей) между особями.

В процессе каждого шага алгоритма оптимизации (каждого поколения) особи с большим значением целевой функции (то есть наименее приспособленные) удаляются. На их место записываются новые особи, полученные одним из 2-х путей:

- с помощью функции мутации, которая осуществляет малые изменения случайных параметров в наборе (случайных генов особи);
- с помощью функции рекомбинации, которая обменивает значения генов между двумя особями одного поколения.

Так как происходит удаление наименее приспособленных особей (отбор), то среднее значение целевой функции в каждом поколении уменьшается (особи становятся все более приспособленными).

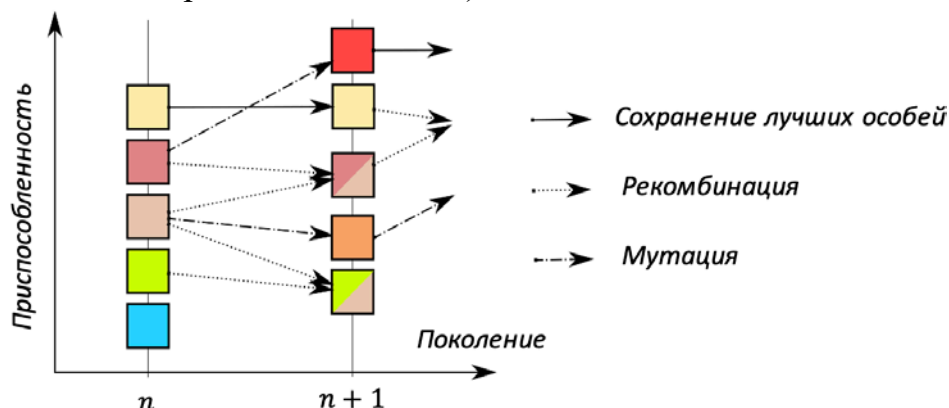


Рис. 6. Схематичное представление принципа работы генетического алгоритма

Для формирования оптимального закона движения беспилотной КМ трасса была представлена набором участков одинаковой длины, на каждом из которых известна кривизна траектории движения k_k , угол наклона опорной поверхности α_k и ограничение максимальной скорости $V_{\max k}$, где индекс k – номер участка.

Каждому участку ставится в соответствие требуемая скорость движения V_k и, для случая беспилотной КМ с двумя ТЭД, коэффициент распределения тяги между электродвигателями h_k . Величины V_k и h_k являются для задачи оптимизации варьируемыми параметрами (то есть геномом особи).

Для работы генетического алгоритма были определены специальные функции создания, мутации и рекомбинации особей. При этом в указанных функциях обеспечено выполнение ограничений варьируемых параметров V_k и h_k (то есть генома) нового поколения:

1. Общее время движения по маршруту должно соответствовать заданному;
2. Требуемая для поддержания заданного режима движения окружная сила тяги не должна превышать значений, ограничиваемых внешней механической характеристикой тяговых электродвигателей;
3. Максимальное продольное ускорение не должно превосходить заданное;
4. Скорость на участке маршрута не должна превосходить максимальное ограничение скорости для этого участка.

В остальном геном особей должен быть подвержен случайным изменениям путем мутации или рекомбинации для того, чтобы от поколения к поколению целевая функция уменьшалась.

Далее в главе диссертации представлены подходы, позволяющие при работе алгоритма учесть ограничения на время в пути, максимальное ускорение и замедление, а также тяговые возможности трансмиссии. Предложены модифицированные функции создания, мутации и рекомбинации.

С учетом описанного был предложен следующий метод определения закона движения и управления тяговыми электродвигателями беспилотной колесной машины по известному маршруту с применением генетического алгоритма. На Рис. 7 представлена блок-схема метода с указанием разделов диссертации, где содержится подробное описание соответствующих особенностей его работы.

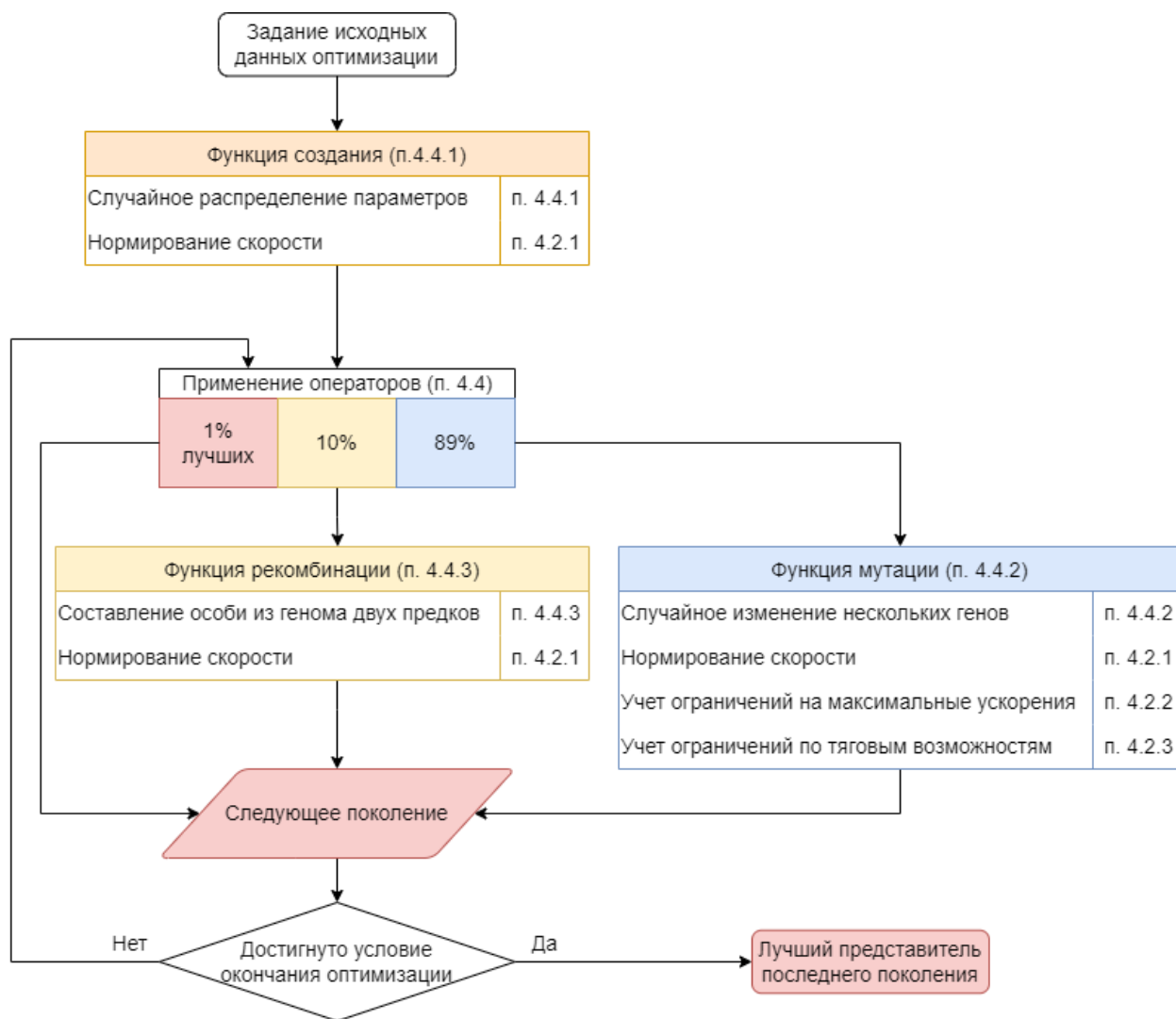


Рис. 7. Блок-схема метода определения оптимального закона движения и управления тяговыми электродвигателями беспилотной колесной машины при движении по известному маршруту

В Главе 5 содержится оценка эффективности применения двух тяговых электродвигателей, работающих в разных скоростных диапазонах, в составе трансмиссии беспилотной КМ. Исследование выполнено для КМ со следующими техническими характеристиками (Таблица 1).

Таблица 1.

Технические характеристики беспилотной колесной машины

Параметр	Значение
Снаряженная масса машины, $m_{\text{снар}}$, кг	24000
Полная масса машины, $m_{\text{полн}}$, кг	44000
Максимальная скорость машины v_{max} , км/ч	60
Свободный радиус колеса, r_k , м	0,461
Площадь лобовой проекции, $F_{\text{лоб}}$, м ²	10,2
Коэффициент аэродинамического сопротивления, c_x	0,7
КПД механической части трансмиссии	0,97

В разделе 5.1 диссертации представлен подход, с помощью которого были определены основные параметры ТЭД для двух вариантов исполнения КМ, представленных на Рис. 2 и 3 (Таблица 2). При расчете учитывалось, что ТЭД имеют ограниченный диапазон $d_{\text{эд}}$ (то есть не способны поддерживать постоянную механическую мощность на всех рабочих частотах вращения вала):

$$d_{\text{эд}} = M_{\text{эдmax}} \cdot \omega_{\text{эдmax}} / N_{\text{эд.d}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{эд.d}}$ – требуемая мощность тягового электродвигателя с учетом обеспечиваемого диапазона; $M_{\text{эдmax}}$ – максимальный крутящий момент ТЭД; $\omega_{\text{эдmax}}$ – максимальная угловая скорость вала ТЭД.

Таблица 2.

Параметры электропривода беспилотной колесной машины

Параметр	Вариант I	Вариант II
Мощность, необходимая для достижения максимальной скорости, $N_{\text{треб}}$, кВт	169	
Максимальная частота вращения ротора электродвигателя, $n_{\text{эдmax}}$, об/мин	3500	
Диапазон электродвигателя, $d_{\text{эд}}$	5	
Максимальный момент электродвигателя/двух электродвигателей, $M_{\text{эдmax}}$, Нм	8091	2308 x 2
Мощность электродвигателя/двух электродвигателей с учетом диапазона, $N_{\text{эдmax}}$, кВт	593	169 x 2
Передаточное отношение для обеспечения максимальной скорости (быстроходного привода) $i_{\text{тр.в}}$	10,45	10,45
Передаточное отношение моментного привода $i_{\text{тр.н}}$	-	26,18

Для беспилотных машин с представленными параметрами были построены динамические характеристики (Рис. 8). Анализ результатов тяговых расчетов КМ позволяет судить о том, что применение в составе трансмиссии двух тяговых

электродвигателей позволяет использовать меньшую общую требуемую мощность привода по сравнению с исполнением с одним двигателем (338 кВт при варианте II, 593 кВт при варианте I). Причем, избыточную энерговооруженность варианта I беспилотной машины не удастся использовать для увеличения быстроходности, так как по результатам тягового расчета требуемая максимальная мощность составляет $N_{\text{треб}} = 169 \text{ кВт}$, а время движения по маршруту задано.

В диапазоне скоростей движения 0...25 км/ч беспилотная КМ варианта II может использовать мощность двух установленных на борту тяговых электродвигателя в разной степени. При этом очевидно, что режимы работы электродвигателей БП и МП значительно отличаются, в том числе по энергоэффективности.

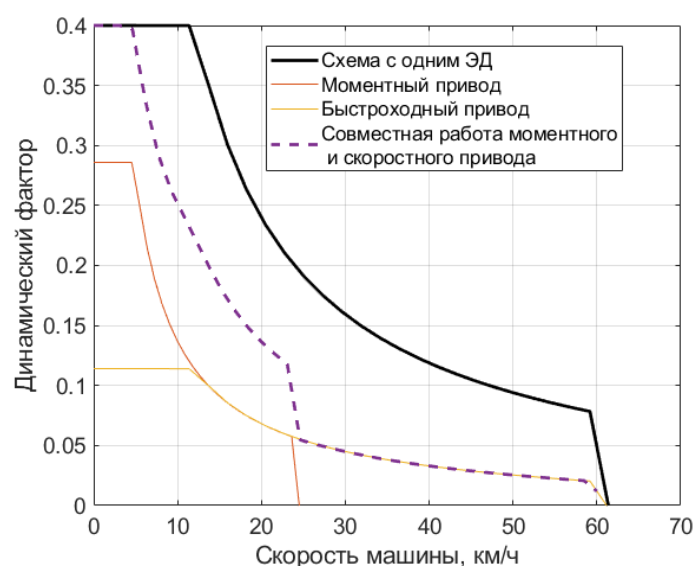


Рис. 8. Динамические характеристики КМ для схемы трансмиссии с одним тяговым электродвигателем (вариант I) и двумя тяговыми электродвигателями (вариант II, в том числе при движении только на МП или БП)

Формирование типового маршрута для циклических грузоперевозок, на примере которого проводилась оценка эффективности разработанного метода и применения нескольких электромашин в составе трансмиссии КМ, представлено в разделе 5.2 диссертации.

С использованием модифицированного генетического алгоритма в соответствии с разработанным методом (Рис. 7) для рассматриваемых машин было выполнено определение закона оптимального изменения скорости на выбранном маршруте с учетом различного заданного времени в пути. Целевой функцией при оптимизации выступала энергия потерь в электродвигателях $E_{\text{пот.эд}}$. Оптимизация проводилась для 200 поколений, по 100 представителей в каждом. Ограничение на максимальное ускорение и замедление было установлено на уровне 1 м/с^2 . Последовательность изменения максимального, минимального и среднего значений целевой функции в рамках каждого поколения в процессе оптимизации для КМ

варианта I представлена на Рис 9. Пример полученного скоростного режима движения представлен на Рис. 10.

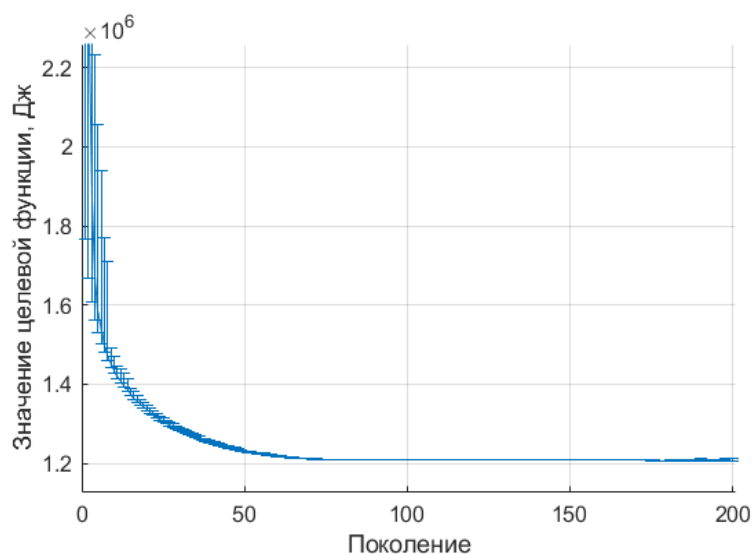


Рис. 9. Наибольшее (худшее), среднее и наименьшее (лучшее) значение целевой функции для каждого поколения при оптимизации прохождения по маршруту КМ с одним ТЭД (верхняя часть графика не показана)

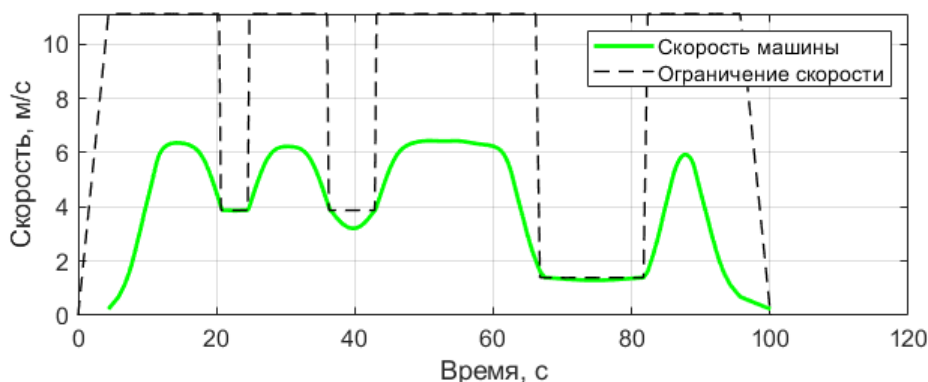


Рис. 10. Пример полученного скоростного режима движения колесной машины

КМ с двумя ТЭД (вариант II) исследовалась аналогичным образом. Проводилось два отдельных этапа оптимизации – сначала определялась оптимальная скорость движения на участках V_k (при этом коэффициент h_k для каждого участка принимался 0,5), затем определялись значения h_k (использовались скорости на участках V_k , полученные на первом этапе). При определении h_k число поколений было выбрано 1000, а число особей – 200.

Обоснование количества поколений и особей, а также оптимизации закона движения в два отдельных этапа (для беспилотной КМ варианта II) приводится в разделах 5.3.1 и 5.3.2 диссертации.

Пример оптимизации коэффициента распределения тяги между МП и БП (Рис. 11) в целом показывает стремление коэффициента h_k к значению 0,85 (то есть приоритетное использование МП) с увеличением использования БП (уменьшением h_k) при больших скоростях движения.

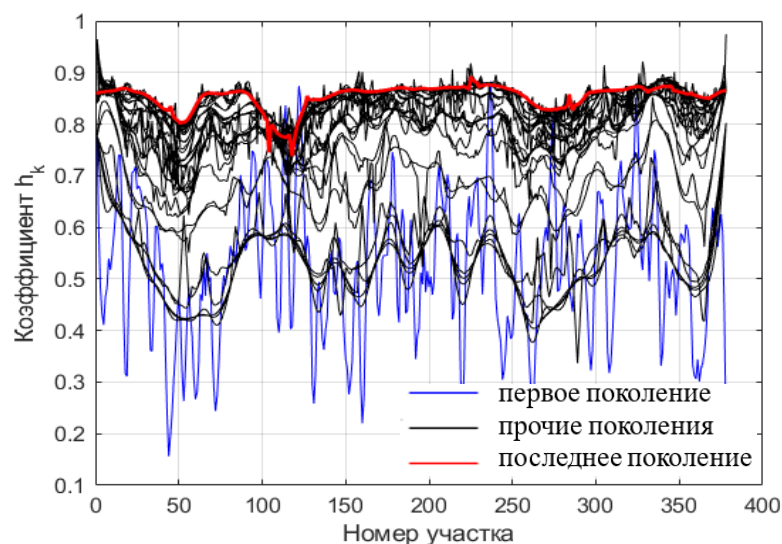


Рис. 11. Лучшие представители каждого десятого поколения оптимизации коэффициента распределения тяги между МП и БП при прохождении по маршруту машины с двумя тяговыми двигателями (варианта II)

В результате оптимальные законы изменения скорости и управления тяговыми электродвигателями беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках для случая применения в составе трансмиссии одного или двух ТЭД получены в следующем виде (Рис. 12).

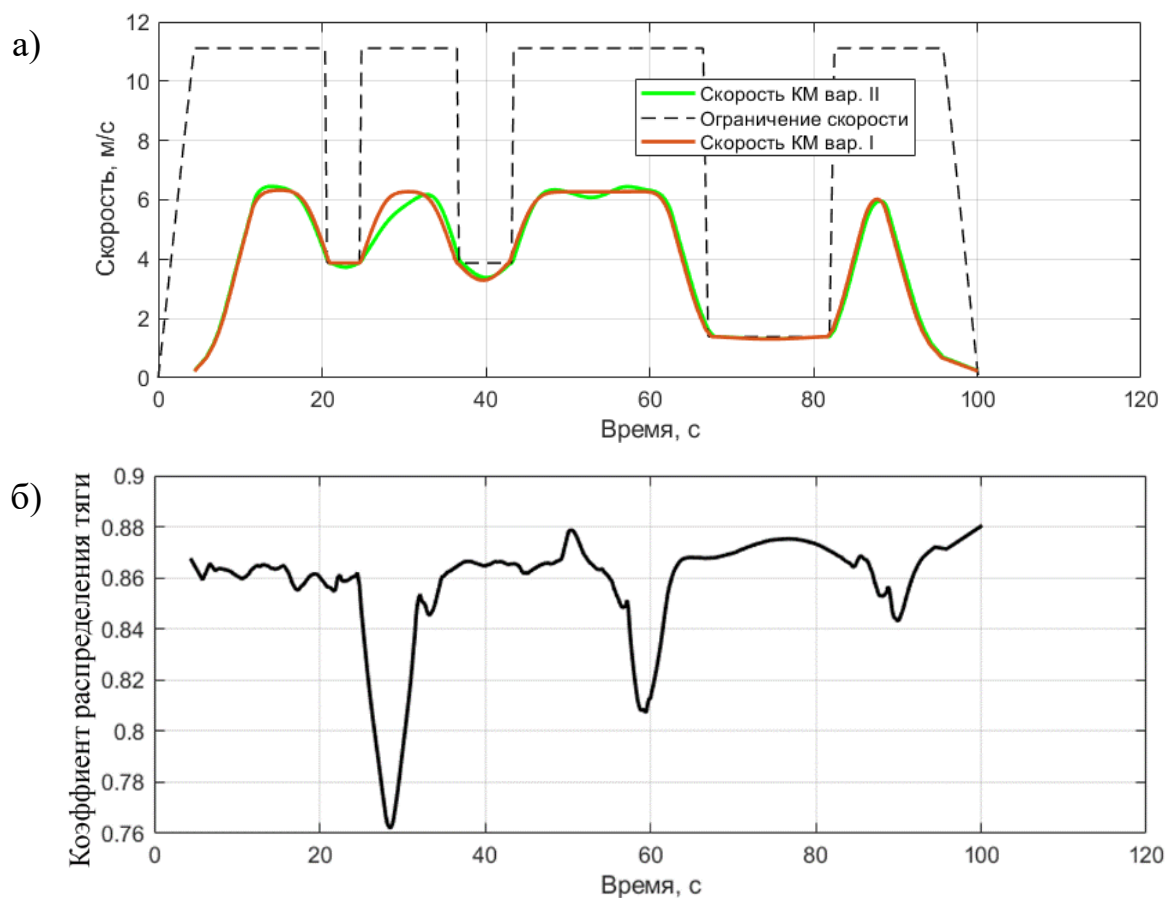


Рис. 12. Результаты оптимизации параметров движения КМ: а) скоростной режим, б) коэффициент распределения тяги между МП и БП (КМ вар. II)

Ниже представлены результаты определения оптимальных законов движения для обоих вариантов беспилотных КМ и разного времени прохождения маршрута в прямом направлении (Таблица 3) и обратном направлении (без груза, Таблица 4).

Таблица 3.

Энергия потерь в тяговых электродвигателях при движении по маршруту в прямом направлении с полной загрузкой колесной машины

Энергия потерь в электромашинах, МДж	Время на маршруте, с				
	100	150	200	250	300
Вариант I	1,29	1,18	1,34	1,55	1,74
Вариант II, оптимизация V_k	1,39	1,14	1,18	1,28	1,39
Вариант II, оптимизация V_k и h_k	1,32	1,05	1,06	1,13	1,23
Преимущество Вар II перед Вар I, %	-2,3	11	20,9	27,1	29,3

Таблица 4.

Энергия потерь в тяговых электродвигателях при движении по маршруту в обратном направлении без груза

Энергия потерь в электромашинах, МДж	Время на маршруте, с				
	100	150	200	250	300
Вариант I	0,94	0,950	1,08	1,25	1,43
Вариант II, оптимизация V_k	1,11	0,914	0,915	0,981	1,06
Вариант II, оптимизация V_k и h_k	1,08	0,882	0,877	0,934	1,00
Преимущество Вар II перед Вар I, %	-14,9	7,2	18,8	25,3	30,1

Представленные результаты позволяют судить о том, что по мере снижения нагрузки на тяговые электродвигатели по причине большего времени на маршруте, энергия потерь беспилотной КМ с двумя электродвигателями (вариант II) становится меньше, чем у КМ с одним электродвигателем (вариант I). Также при снижении средней скорости растет эффект от дополнительной оптимизации по коэффициенту h_k , определяющему вклад крутящего момента электродвигателей быстроходного и моментного привода.

При этом, в обоих вариантах КМ по мере роста времени движения по маршруту общие потери в электродвигателях вначале падают, а затем начинают увеличиваться. Это связано с тем, что принятая характеристика эффективности электродвигателей

обладает наибольшим значением КПД в районе центра характеристики (в номинальном режиме работы).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основным инструментом диссертационного исследования является математическая модель, описывающая беспилотную колесную машину как твердое тело, движение которого приведено к криволинейной координате. Модель является вычислительно эффективной и приспособленной к работе внутри цикла оптимизации. Представленная модель позволяет учитывать увеличение сопротивления при криволинейном движении колесной машины на основе предложенной расчетно-экспериментальной зависимости.

2. Сформирована методика получения расчетно-экспериментальных зависимостей, описывающих повышение сопротивления при криволинейном движении колесной машины от скорости и кривизны траектории. В ходе натурного эксперимента указанная методика была апробирована и получена зависимость, описывающая повышение сопротивления при криволинейном движении на примере машины КАМАЗ-63934. Применение указанной зависимости при оценке энергоэффективности движения транспортного средства позволит существенно повысить точность получаемых результатов, особенно при исследовании режимов движения, характеризующихся малыми радиусами поворота и скоростным маневрированием за счет учета ряда особенностей, связанных с поворотом машины (сопротивление повороту пятен контакта колес, особенности кинематики рулевой трапеции, сопротивление вызванное уводом колес при движении на околокритических скоростях, боковое скольжение колес неуправляемых осей). Необходимо отметить, что эти особенности затруднительно оценивать математически в рамках модели динамики транспортного средства, пригодной для решения задачи оптимизации закона движения.

3. Разработан метод определения оптимального скоростного режима и закона управления электродвигателями беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках, базирующийся на генетическом алгоритме. Алгоритм оптимизации предполагает наличие заданного маршрута, разбитого на участки равной длины, каждый из которых характеризуется кривизной, углом наклона опорной поверхности и ограничением максимальной скорости движения машины. В результате работы алгоритма определяется требуемая скорость движения колесной машины и коэффициент распределения тяги между электродвигателями на каждом участке пути. В качестве целевой функции оптимизации используется суммарная энергия потерь в тяговых электродвигателях при движении по маршруту.

4. Разработаны принципы, позволяющие при использовании предлагаемого метода учесть ограничения на время в пути, максимальное ускорение и замедление,

а также тяговые возможности трансмиссии. Предложены модифицированные функции создания, мутации и рекомбинации, которые необходимы для работы алгоритма. Указанные функции позволяют получить следующее поколение отличающимся от предыдущего и осуществить «сглаживание» получаемых скоростей, что ускоряет сходимость метода. Учет ограничений на максимальное ускорение, замедление, а также тяговые возможности трансмиссии происходит только в функции мутации для обеспечения генетического разнообразия в процессе оптимизации.

5. Применение в составе трансмиссии двух ТЭД в совокупности с редукторами, имеющими разное передаточное отношение, позволяет использовать электродвигатели со значительно меньшей суммарной мощностью, чем в случае попытки обеспечить диапазон трансмиссии машины одним электродвигателем (до 43%). Это позволяет обеспечить меньшие массу, габаритные размеры и стоимость электропривода машины с двумя ТЭД.

6. Анализ результатов определения законов оптимального управления тяговым электроприводом беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках позволяет заключить, что:

- по потерям энергии КМ варианта II (с двумя ТЭД) имеет преимущество в тех случаях, когда не требуется длительная работа тяговых электродвигателей на внешней характеристике и есть возможность «управлять» их тягой, то есть при длительном/среднем заданном времени прохождения маршрута (до 25 - 30% при сравнении варианта I и варианта II с учетом оптимизации по h_k);

- в случае высокой загрузки электродвигателей, при малом заданном времени на маршруте, более эффективной является КМ варианта I (от 2 до 15% при сравнении варианта I и варианта II с учетом оптимизации по h_k);

- во всех проведенных заездах наблюдается заметный эффект от применения оптимизации по степени загрузки электродвигателей моментного и быстроходного привода (от 3% до 12% при сравнении варианта II без оптимизации по h_k и варианта II с оптимизацией по h_k), что подтверждает эффективность разработанного метода.

7. Применение для беспилотной колесной машины двух электродвигателей в совокупности с редукторами с разным передаточным отношением целесообразно как с позиции уменьшения габаритных размеров, массы и стоимости тяговых электродвигателей (за счет меньшей требуемой максимальной мощности), так и с целью повышения энергоэффективности циклических грузоперевозок. При этом для повышения энергоэффективности следует использовать получаемый при помощи разработанного метода закон управления моментным и быстроходным приводом.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Метод определения закона энергоэффективного движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках / С.В. Назаренко [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 116-130. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_116. (1,6 п.л. / 1 п.л.);
2. Применение генетического алгоритма для определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках / С.В. Назаренко [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 97-110. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_97. (1,2 п.л. / 0,8 п.л.);
3. Метод определения энергоэффективного закона движения карьерного автосамосвала / С.В. Назаренко [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. 2020. № 3(149). С. 11-24. DOI 10.26730/1816-4528-2020-3-11-24. (1,5 п.л. / 1 п.л.);
4. Ensuring Energy Efficiency and Safety of the Cyclic Operation of the Mining Dump Truck / S. Nazarenko [et al.] // E3S Web of Conferences : 5, Kemerovo, 19–21 октября 2020 года. Kemerovo, 2020. P. 03009. (1,15 п.л./ 0,8 п.л.).
5. Назаренко С.В. Методика экспериментальной оценки повышения сопротивления при криволинейном движении колесной машины // Грузовик. 2024. №4. С. 14-19. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-4-14-19 (0,6 п.л.).