

На правах рукописи



Гончаров Кирилл Александрович

**РАЗВИТИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
МНОГОПРИВОДНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ**

2.5.2. Машиноведение

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ).

Научный консультант: **Лагерев Игорь Александрович**,  
доктор технических наук, доцент

Официальные  
Оппоненты: **Анцев Виталий Юрьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра «Подъемно-транспортные машины и оборудование», заведующий кафедрой

**Романович Алексей Алексеевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», кафедра подъемно-транспортных и дорожных машин, заведующий кафедрой

**Кондратьев Александр Владимирович**,  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет», кафедра «Строительные, дорожные машины и оборудование», заведующий кафедрой

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ)

Защита состоится «20» октября 2022 г., в 13:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), <https://www.miiit.ru>.

Автореферат разослан «1» сентября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета \_\_\_\_\_  Воронин Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Ленточные конвейеры являются одним из самых эффективных средств непрерывного промышленного транспорта, применяемым в различных отраслях народного хозяйства. По данным независимых маркетинговых исследований в структуре распределения парка ленточных конвейеров в России по отраслям промышленности в период с 2010 по 2012 г.г. суммарная доля машин данного типа, приходящаяся на угольную добывающую промышленность, черную и цветную металлургию, по отношению ко всему парку эксплуатируемых ленточных конвейеров составляет 71,7 %, что фактически отражает долю эксплуатируемых мощных ленточных конвейеров во всем объеме машин данного типа.

Тяговый расчет является одной из основных процедур при проектировании ленточных конвейеров. Вопросам совершенствования тягового расчета посвящено значительное количество научных изысканий, проведенных как в России, так и за рубежом. Наиболее полный спектр многофакторных исследований был проведен в СССР при непосредственном участии ученых Московского горного института (МГИ). В результате был создан наиболее точный из существующих метод тягового расчета, позволяющий учесть особенности трассы конвейера, скорость движения ленты, свойства груза, внешние условия работы машины и другие факторы. Основой данного метода является глубокое теоретико-экспериментальное исследование сопротивлений движению ленты конвейера. При этом все преимущества его применения в условиях проектирования многоприводных ленточных конвейеров в контексте точности тягового расчета могут быть нивелированы возможными ошибками при определении тяговых усилий, реализуемых приводами.

Исследования возможностей применения в структуре ленточных конвейеров нескольких приводов проводились в СССР с середины XX века. Был создан ряд экспериментальных образцов многоприводных конвейеров. Однако в связи с несовершенством методов их проектирования одним из основных факторов, сформировавших в инженерном сообществе скептицизм в отношении машин данного типа, стал высокий уровень затрат при их эксплуатации. Необходимость тотального контроля работы таких конвейеров вместе со сложностями настройки непосредственно повлияли на снижение количества проектируемых многоприводных машин с отдачей предпочтения классическим одно-, двух- и трехбарабанным головным системам приводов.

Подобная картина наблюдалась и в США. На момент 2003 года в США не осталось ленточных конвейеров с промежуточными ленточными приводами. При проектировании предпочтение отдается барабанным приводам типа «ложный сброс». В странах Европы и в Китае данная проблема решается за счет создания сложных и дорогостоящих систем управления приводами конвейеров. Данные системы отслеживают состояние значительного количества текущих параметров работы конвейера, анализируют их и

применяют различные управляющие воздействия для поддержания работоспособности машины.

Поиск решения задачи качественного проектного расчета распределения тяговых усилий внутри систем приводов ленточных конвейеров в настоящее время становится еще более актуальным. Постоянно растущие транспортные грузопотоки в различных отраслях народного хозяйства способствуют лишь увеличению количества эксплуатируемых мощных протяженных ленточных конвейеров. Закупка и применение зарубежных образцов с дорогостоящими системами управления не является решением рассматриваемой научной проблемы, так как предусматривает значительные материальные издержки.

Возможность проведения процедуры проектного тягового расчета высокой точности применительно к многоприводным конвейерам с целью снижения их себестоимости при дальнейшем производстве является важной научно-технической задачей. Для решения данной задачи требуется развитие элементов теории проектирования многоприводных ленточных конвейеров на основе создания математических моделей распределения тяговых усилий внутри систем приводов, учитывающих случайную природу ряда сопутствующих рабочих процессов, и их интеграции в существующие методы тягового расчета, что позволит трансформировать полученный симбиоз в научную концепцию единого дифференциального тягового расчета ленточных конвейеров. Таким образом, тема диссертационного исследования является актуальной.

**Степень разработанности темы.** Научным вопросам тягового расчета и проектирования ленточных конвейеров посвящены исследования Н.В. Ампиловой, В.И. Галкина, В.Г. Дмитриева, В.В. Дмитриевой, В.П. Дунаева, В.П. Дьяченко, В.А. Дьякова, В.К. Дьякова, И.В. Запенина, А.Ю. Захарова, О.В. Зеленского, Р.Л. Зенкова, В.Н. Ивченко, Г.Г. Кожушко, А.В. Лагерева, И.А. Лагерева, В.Ф. Монастрыского, Ю.А. Пертена, А.А. Реутова, А.Г. Рыжиковой, С.П. Сазонова, Г.И. Солода, А.О. Спиваковского, Ю.Д. Тарасова, Е.Н. Толкачева, Л.И. Чугреева, Л.Г. Шахмейстера, Е.Е. Шешко, Д.А. Юнгмейстера, М.А. Asplough, Gao Ya, J.A. Dos Santos, S. Huppert, M. Jansen, K. Keller, F. Kessler, W. Kohler, W. Lubrich, P. McGuire, A. Nuttall, J. Peyer, J. Pfeifer, F. Reiner, M. Scheffler, E.A. Viren, M. Winkel и других ученых.

В работах указанных исследователей подробно изучены вопросы определения сопротивлений движению ленты по трассе конвейера, предложены методики проектирования различных систем ленточных конвейеров. Подробно изложены процедуры приближенного и уточненного тягового расчета. Однако недостаточно внимания уделено адаптации процедуры тягового расчета к процессу проектирования многоприводных конвейеров в связи с малой изученностью особенностей распределения тяговых усилий между приводами. Известные отдельные математические модели не позволяют оценить указанные особенности с учетом многовариантности входных параметров и случайной природы ряда рабочих процессов, протекающих в системах приводов ленточных конвейеров.

**Объектом исследования** являются системы приводов ленточных конвейеров.

**Целью исследования** является развитие элементов теории проектирования многоприводных ленточных конвейеров на основе вероятностного прогнозирования расчетных ситуаций, дифференциации тягового расчета в зависимости от уникальности структур систем приводов, реализации рекомендаций в области управления работой приводов, позволяющих в совокупности обеспечивать наилучшие показатели качества проектируемой машины в соответствии с принятыми критериями эффективности.

**Задачи исследования.** Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи.

- Разработать вероятностную математическую модель распределения тяговых усилий внутри систем приводов ленточных конвейеров, обеспечивающую повышенную точность их определения в любом случайном сочетании барабанных и ленточных приводов в структуре одного конвейера. Вероятностная математическая модель должна учитывать допустимые нормативными документами и нерегламентированные случайные возможные отклонения скольжения электродвигателей приводов в контексте качества их исполнения, тип применяемой системы управления работой приводов, влияние продольного растяжения грузонесущей и тяговых лент на распределение тяговых усилий внутри системы приводов конвейера.

- Разработать математическую модель совместной работы электродвигателей и гидромуфт в структуре приводов ленточных конвейеров, учитывающую возможные отклонения их скольжения от номинальных значений, позволяющую формировать аналитическое описание функции механической характеристики совместной работы электродвигателя и гидромуфты.

- На основе вероятностной математической модели установить закономерности совместной работы приводов ленточных конвейеров при наличии случайных отклонений механических характеристик их электродвигателей. Разработать комплекс проектных мер, реализующих рациональную компоновку систем приводов на основе полученных закономерностей с учетом критериев их эффективности.

- Экспериментально исследовать процесс формирования потока груза при его истечении через каскад выпускных отверстий в загрузочных и перегрузочных пунктах трасс ленточных конвейеров с целью синтеза рекомендаций по учету особенностей перегрузочных процессов при проектировании промежуточных приводов типа «ложный сброс».

- Разработать экспериментальный стенд и выполнить исследования в области влияния конструкции промежуточного ленточного привода на его рабочие процессы с целью синтеза рекомендаций в вопросе определения тяговой способности приводов данного типа. Интегрировать указанные рекомендации в разработанные математические модели.

- На основе предлагаемых математических моделей и проведенных экспериментальных исследований разработать метод дифференциального тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров, позволяющий варьировать степень точности его проведения в зависимости от целей расчета и уникальности структур систем приводов. Установить закономерности применения данного метода для ленточных конвейеров с системами приводов различной конфигурации.

- На основе предлагаемых математических моделей и проведенных экспериментальных исследований с учетом метода дифференциального тягового расчета разработать и научно обосновать технические решения, позволяющие реализовывать дополнительные возможности по управлению работой приводов ленточных конвейеров без усложнения и принципиального изменения систем управления двигателями.

**Научная новизна** работы заключается в дальнейшем развитии элементов теории проектирования многоприводных ленточных конвейеров на основе вероятностного моделирования различных компонентов работы системы приводов, позволяющего в комплексе с существующими методами приближенного и уточненного тягового расчета повысить точность данной проектной процедуры при неопределенности и случайном характере входных параметров. Подобный результат позволяет решать важную научно-техническую проблему повышения экономичности и эффективности применяемых в различных отраслях российской экономики ленточных конвейеров за счет существенного расширения возможностей их проектного анализа и синтеза. Научная новизна получена за счет того, что:

- сформулирована концепция дифференциального тягового расчета ленточных конвейеров случайной конфигурации, основанная на представлении структурных элементов процесса тягового расчета в виде трех взаимосвязанных классифицирующих признаков «принцип распределения тяговых усилий между приводами – особенности конструкции приводов – принцип определения сопротивлений передвижению ленты» с соответствующим математическим описанием, набор которых для каждого уникального проектного случая формирует соответствующие специфические системы уравнений тягового расчета;

- разработана вероятностная математическая модель распределения тяговых усилий внутри систем приводов ленточных конвейеров, позволяющая анализировать возможные случайные комбинации тяговых усилий при неопределенности ряда входных параметров (типов применяемых лент, типов применяемых систем управления приводами, действительных механических характеристик, реализуемых поставляемыми электродвигателями), прогнозировать технические последствия отказа системы приводов при неблагоприятном случайном сочетании параметров моделирования, определять на стадии проектирования технические меры воздействия, обеспечивающие качественную работу конвейера;

- разработана математическая модель совместной работы электродвигателей и гидромуфт, позволяющая анализировать возможные негативные сочетания их механических характеристик при отклонении скольжения от номинальных значений, синтезировать аналитическое описание функции механической характеристики совместной работы электродвигателя и гидромуфты;

- установлены закономерности совместной работы приводов ленточных конвейеров при наличии случайных отклонений механических характеристик их электродвигателей и разработан комплекс проектных мер, позволяющий формировать эффективные системы приводов на основе минимизации влияния неблагоприятных случайных факторов производства и эксплуатации на их работу;

- получены и обобщены результаты экспериментальных исследований, позволяющие повысить точность процедуры проектирования промежуточных барабанных приводов ленточных конвейеров типа «ложный сброс» в части учета особенностей формирования потока груза при прохождении перегрузочных пунктов с нерегулируемыми каскадами выпускных отверстий с целью минимизации воздействия циклических ударных нагрузок на грузонесущую ленту при транспортировании мелкокусковых, зернистых, порошкообразных и пылевидных грузов;

- получены и обобщены результаты экспериментальных исследований, позволяющие повысить точность процедуры проектирования промежуточных ленточных приводов ленточных конвейеров в части учета неравномерности сцепления грузонесущей и тяговой лент по ширине, формирующей условия ограничения буксования приводов данного типа.

**Теоретическая значимость** работы заключается в том, что:

- разработаны математические модели, установлены и исследованы закономерности распределения тяговых усилий внутри систем приводов ленточных конвейеров в условиях предпроектной неопределенности ряда конструктивных параметров с учетом случайного характера их воздействия на рабочие процессы систем приводов;

- обоснованы общие условия применения различных типов систем управления при проектировании структур систем приводов ленточных конвейеров случайной конфигурации;

- разработана система внутренних сочетаний отклонений скольжения электродвигателей для многодвигательных приводов ленточных конвейеров, обязательных для анализа при проведении процедуры дифференциального тягового расчета;

- сформированы зависимости, позволяющие оценить трудоемкость вероятностного моделирования распределения тяговых усилий внутри системы приводов ленточного конвейера с учетом её структуры, а также составить детальные качественные описания каждого расчетного случая при моделировании;

- уточнен и обоснован комплекс критериев оценки эффективности систем приводов ленточных конвейеров; определены условия, обеспечивающие

корректное применение данного комплекса в контексте различных методов принятия проектных решений;

- экспериментально выявлена нестабильность процесса истечения груза через каскад выпускных отверстий в загрузочных и перегрузочных пунктах трасс конвейеров в части значений коэффициента истечения груза, влияющая на дифференциацию величин распределенных нагрузок при проведении тягового расчета; установлена необходимость обязательного экспериментального уточнения данного параметра в каждом конкретном случае применения загрузочных устройств с каскадом выпускных отверстий;

- экспериментально установлены закономерности взаимодействия грузонесущей и тяговой лент промежуточного привода конвейера, в частности неравномерность их сцепления в зоне контакта по ширине, что выражается в проявлении ряда преимущественных продольно ориентированных зон, расположение которых в поперечной ориентации соответствует точкам контакта сечений лент с ребрами роликов поддерживающих роликкоопор.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что:

- на основе созданных математических моделей разработан метод дифференциального тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров, позволяющий варьировать степень точности его проведения в зависимости от целей расчета и уникальности структур систем приводов;

- разработан комплекс проектных мер, реализующих рациональную компоновку систем приводов ленточных конвейеров с учетом критериев эффективности на основе полученных закономерностей их совместной работы при случайных отклонениях механических характеристик электродвигателей;

- разработана принципиальная схема и создана натурная конструкция экспериментального стенда для исследования влияния конструкции промежуточного ленточного привода ленточного конвейера на его рабочие процессы, защищенная патентом РФ; предложены методики выполнения ряда экспериментальных исследований с использованием разработанного стенда;

- разработан, теоретически обоснован и защищен патентами РФ ряд технических решений дифференциальных натяжных устройств ленточных конвейеров, позволяющих реализовывать дополнительные возможности по управлению работой приводов ленточных конвейеров без усложнения и принципиального изменения систем управления двигателями;

- разработаны базовые положения и предложена поэтапная общая методика теплового диагностирования ленточных конвейеров.

**Методология и методы исследования.** Теоретические исследования проводились на основе положений и методов теории вероятностей и случайных процессов, теоретической механики, теории механизмов и машин, компьютерного имитационного моделирования, экспериментальной механики, термодинамики, статистических испытаний, теории принятия решений.

**Положения, выносимые на защиту:**

- научная концепция дифференциального тягового расчета ленточных конвейеров случайной конфигурации, основанная на представлении структурных

элементов процесса тягового расчета в виде трех взаимосвязанных классифицирующих признаков «принцип распределения тяговых усилий между приводами – особенности конструкции приводов – принцип определения сопротивлений передвижению ленты» с соответствующим математическим описанием;

- вероятностная математическая модель распределения тяговых усилий внутри систем приводов ленточных конвейеров, позволяющая прогнозировать технические последствия отказа системы приводов при неблагоприятном случайном сочетании параметров моделирования, определять на стадии проектирования технические меры воздействия, обеспечивающие качественную работу конвейера;

- математическая модель совместной работы электродвигателей и гидромурфт, позволяющая анализировать возможные негативные сочетания их механических характеристик при отклонении скольжения от номинальных значений, синтезировать аналитическое описание функции механической характеристики совместной работы электродвигателя и гидромурфты;

- установленные закономерности совместной работы приводов ленточных конвейеров при наличии случайных отклонений механических характеристик их электродвигателей и комплекс проектных мер, позволяющий формировать эффективные системы приводов на основе минимизации влияния неблагоприятных случайных факторов производства и эксплуатации на их работу;

- метод дифференциального тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров, позволяющий варьировать степень точности его проведения в зависимости от целей расчета и уникальности структур систем приводов;

- научно обоснованные технические решения по совершенствованию конструкций натяжных устройств ленточных конвейеров.

**Степень достоверности** научных положений и выводов подтверждается корректным использованием методов исследования, результатами проведенных натурных экспериментов, опытом проектирования и эксплуатации ленточных конвейеров различного назначения и конфигурации.

**Апробация результатов работы.** Результаты исследований были представлены на International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (г. Томск, Томский политехнический университет, 2015 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники» (г. Брянск, БГТУ, 2017, 2018, 2019 г.г.); Всероссийской научно-практической конференции «Современная наука: идеи, которые меняют мир» (г. Брянск, БГУ им. академика И.Г. Петровского, 2018 г.); International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering (г. Санкт Петербург, 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Энерго-ресурсосберегающие машины, оборудование и экологически чистые технологии в дорожной и строительной отраслях» (г. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018, 2019 г.г.); 4<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering (г. Москва, Московский политехнический университет, 2018 г.); на научном

семинаре кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» БГТУ (г. Брянск, 2019 г.); Международной научно-практической конференции «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях» (г. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020 г.); на научных семинарах кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» РУТ (МИИТ) (г. Москва, 2021 г.).

**Реализация результатов работы.** Разработанные математические модели, метод и методики, а также практические рекомендации используются: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»; ООО «Научно - исследовательский институт автоматики, телемеханики и метрологии» (г. Брянск) при выборе типов двигателей и систем управления последовательными конвейерными линиями и другими механизмами с синхронизированной работой; ОАО «Кузбасгипрошахт» (г. Кемерово) при проектировании систем приводов многоприводных ленточных конвейеров.

**Личный вклад соискателя** состоит в постановке целей и задач, разработке математических моделей, создании концепции, методик и технических решений при проведении экспериментальных исследований, обобщении и систематизации полученных результатов, а также научном обосновании технических решений, защищенных патентами.

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 43 публикациях. В том числе 12 статей в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (перечень ВАК); 4 статьи в изданиях, входящих в международные базы Scopus и Web of Science; 8 патентов РФ на полезную модель, 17 публикаций в других научных изданиях. Опубликовано 2 монографии (из них одна – единолично).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Объем работы с приложениями – 293 страницы. Диссертация содержит 119 рисунков, 21 таблицу, 3 приложения, 314 источников.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** определен объект исследования, обоснована актуальность работы, проанализирована степень разработанности темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, изложены научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость, дана краткая характеристика работы.

**В первом разделе** проанализированы существующие типовые и уникальные конструкции систем приводов ленточных конвейеров, подробно рассмотрены применяемые в них системы управления с учетом разветвленных перечней устройств безопасности, формируемых в зависимости от назначения

конвейеров. Предложена классификация устройств безопасности по степени воздействия на привод. Разработан обобщенный перечень данных устройств на основе систематизации требований нормативных документов к шахтным многоприводным ленточным конвейерам.

Выполнен критический анализ существующих отечественных и зарубежных методов моделирования, тягового расчета и проектирования ленточных конвейеров, что позволило выявить их проблемные положения, недостатки и ограничения применения.

Проведенный анализ и выполненный литературный обзор научных работ позволил сформулировать указанные цели и задачи диссертации.

**Во втором разделе** представлена разработанная вероятностная математическая модель распределения тяговых усилий внутри систем приводов ленточных конвейеров, позволяющая анализировать возможные случайные комбинации тяговых усилий при неопределенности ряда входных параметров.

Математическая модель базируется на вероятностном подходе к определению отклонений скольжения электродвигателей приводов ленточных конвейеров в рамках закона нормального распределения вероятностей. В основу подхода положена идея зависимости границ интервала отклонения скольжения электродвигателя от качества его исполнения с одной стороны, и вариации указанных границ в зависимости от применяемых в приводах систем управления и необходимой точности расчета – с другой.

В качестве базиса в математическую модель вводится коэффициент надежности по механической характеристике поставляемого электродвигателя (ЭД)  $K_H$ . Данный коэффициент является входным параметром при моделировании распределения тяговых усилий и отражает вероятность  $P_H$  того, что поставленный предприятием-изготовителем конкретный электродвигатель характеризуется отклонением его номинального скольжения  $\varepsilon_{ном}$  в пределах

$$0,8\varepsilon_{ном} \leq \varepsilon_{ном} \leq 1,2\varepsilon_{ном}, \quad (1)$$

определяемых согласно ГОСТ Р 52776-2007. Указанный интервал отклонений скольжения ЭД не является единственным возможным, т.к. формируется по данным нормативных документов, сопровождающих производство электродвигателей на различных предприятиях.

В указанном интервале разброс значений  $\varepsilon_{ном}$  представляется с помощью нормального распределения с математическим ожиданием  $a = \varepsilon_{ном}$  и функцией плотности вероятности

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon - \varepsilon_{ном})^2}{2\sigma^2}}. \quad (2)$$

Среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  определяется из функции распределения при заданной вероятности  $P_H = K_H$ , полагая заданный интервал отклонения скольжения симметричным относительно  $\varepsilon_{ном}$

$$P_H = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{1,2\varepsilon_{ном} - \varepsilon_{ном}}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{0,8\varepsilon_{ном} - \varepsilon_{ном}}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3)$$

При выходе возможных величин скольжений электродвигателей за пределы нормативных интервалов возникает необходимость определения действительных границ этих интервалов (также в предположении их симметрии относительно  $\varepsilon_{ном}$ ). При известных и определенных значениях  $\varepsilon_{ном}$  и  $\sigma$  искомые границы интервала  $[\alpha; \beta]$  соответствуют вероятности попадания в них значений скольжения  $P_H = 1$ . Таким образом, функция нормального распределения запишется в виде

$$1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\beta - \varepsilon_{ном}}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\alpha - \varepsilon_{ном}}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (4)$$

Искомые действительные границы интервала  $[\alpha; \beta]$  определяются решением данного уравнения. Полученный действительный интервал отклонений скольжения в дальнейшем используется для формирования системы сочетаний отклонений скольжения электродвигателей привода.

В зависимости от типа применяемых систем управления приводами и требуемой степени точности тягового расчета разработаны рекомендации по выбору величины  $P_H$ . Для адекватного построения математической модели классифицированы отдельные группы отклонений по причинам их возникновения и локализации их влияния (рисунок 1) в структурах многодвигательных приводов, а также предложены зависимости, определяющие необходимое количество сочетаний отклонений скольжения электродвигателей при вероятностном моделировании и тяговом расчете для системы приводов случайной конфигурации.

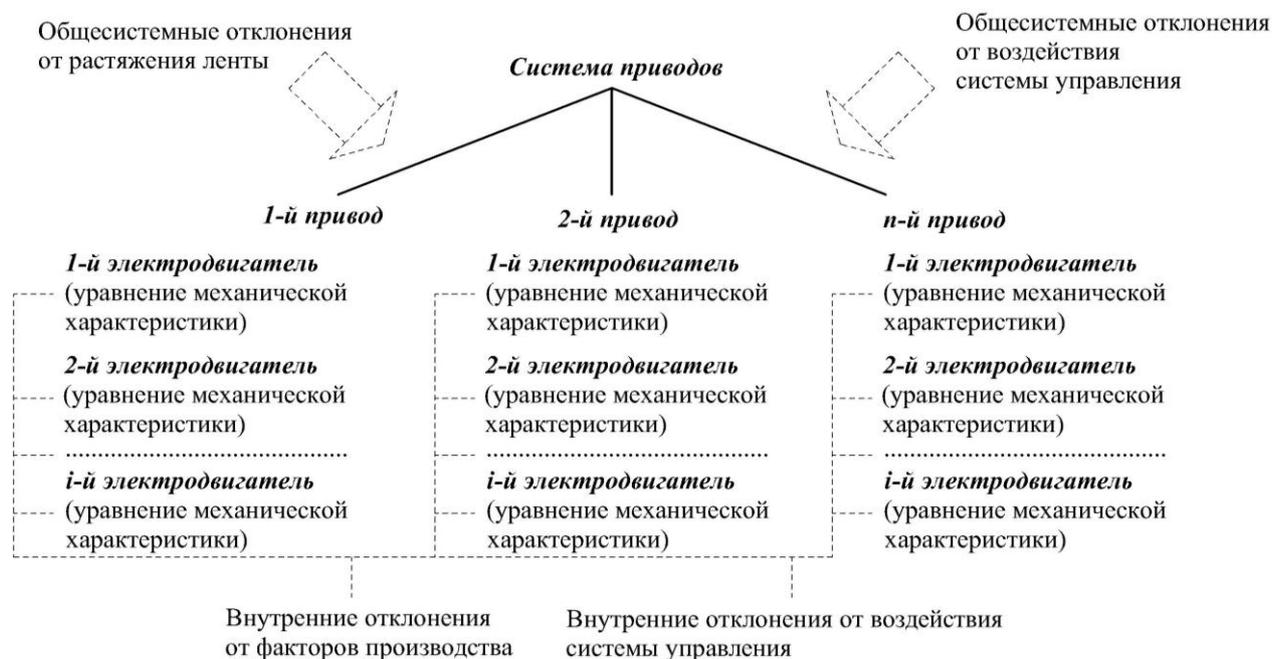


Рисунок 1 – Иерархическая структура системы приводов с действующими отклонениями

Обобщенная структура вероятностной математической модели распределения тяговых усилий внутри систем приводов ленточных конвейеров представлена на рисунке 2.

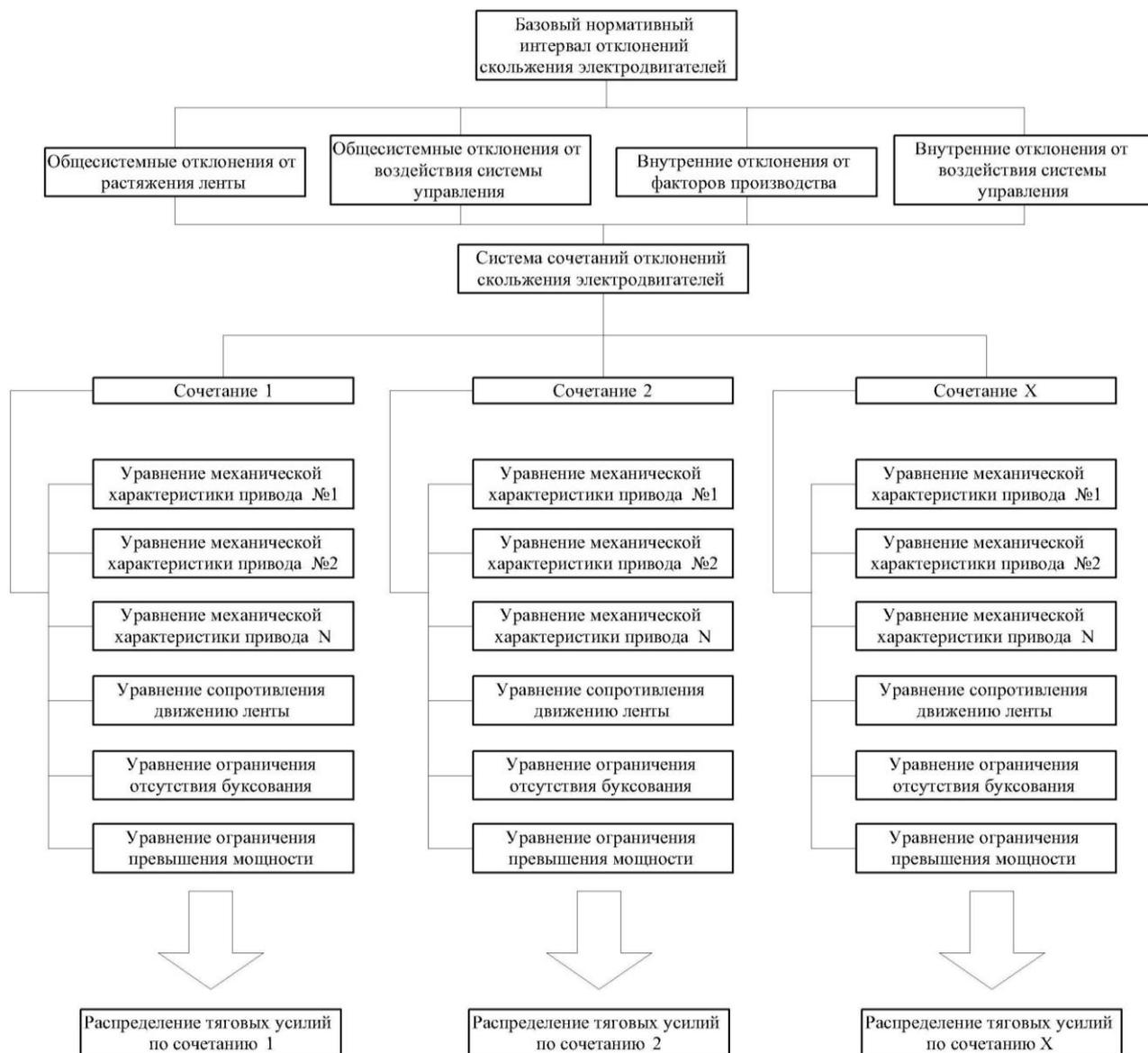


Рисунок 2 – Обобщенная структура вероятностной математической модели распределения тяговых усилий

При построении вероятностной математической модели реализован следующий принцип учета продольного растяжения тяговых и грузонесущей лент: в реальном конвейере упругая лента (с разными скоростями в разных точках трассы) синхронизирует работу приводов, имеющих отклонения механических характеристик в соответствии с качеством их изготовления; в предлагаемой математической модели лента принимается в виде абсолютно неупругого элемента с одинаковыми скоростями в разных точках трассы конвейера, при этом скольжение электродвигателя каждого привода получает

дополнительное отклонение, эквивалентное изменению скоростей на обечайках приводных барабанов, в случае учета упругих свойств ленты.

Максимальное значение интервала дифференциации скоростей соответствует возрастанию на рассматриваемом участке конвейера натяжения ленты до максимальной величины, по которой производят выбор ленты с учетом коэффициентов запаса. Таким образом, в общем случае при применении в качестве грузонесущей и тяговой резинотканевых лент известного типоразмера с определенной шириной максимальное отклонение скольжения (%) электродвигателя какого-либо привода по отношению к номинальному значению составит (для контура одной ленты)

$$\Delta\varepsilon = \left[ \left( 1 + \frac{50s}{(0,8\dots 1,2)B} \right) (1 - \varepsilon_{ном}) - 1 + \varepsilon_{ном} \right] \frac{100}{\varepsilon_{ном}}, \quad (5)$$

где  $s$  – нормативное относительное удлинение ленты;  $B$  – ширина ленты, мм.

Для конвейеров с несколькими контурами лент (грузонесущим и тяговыми)

$$\Delta\varepsilon = \left[ \left( 1 + \frac{50s_{зп}}{(0,8\dots 1,2)B_{зп}} \right) \left( 1 + \frac{50s_m}{(0,8\dots 1,2)B_m} \right) (1 - \varepsilon_{ном}) - 1 + \varepsilon_{ном} \right] \frac{100}{\varepsilon_{ном}}, \quad (6)$$

где  $s_{зп}$  – нормативное относительное удлинение грузонесущей ленты на рассматриваемом участке трассы конвейера;  $s_m$  – нормативное относительное удлинение тяговой ленты на рассматриваемом участке трассы промежуточного привода;  $B_{зп}$  – ширина грузонесущей ленты, мм;  $B_m$  – ширина тяговой ленты, мм.

В случае применения в структуре приводов электродвигателей в сочетании с гидромуфтами необходим синтез аналитического описания функции механической характеристики их совместной работы. Представление данной функции в виде прямой искажает результаты моделирования работы приводов в некоторых сочетаниях, в частности, при моделировании последовательного отказа или остановки приводов одной системы. В работе предлагается представлять рассматриваемую функцию гиперболой вида

$$M_m(n_m) = \frac{-b_1}{a_1 \cdot (n_c - n_m) + c_1} + d_1, \quad (7)$$

где  $n_c$  – синхронная частота вращения электродвигателя;  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $d_1$  – параметры функции.

Структурная схема математической модели совместной работы электродвигателей и гидромуфт представлена на рисунке 3.

На основе разработанных математических моделей предложен способ определения зон относительного скольжения и покоя грузонесущей и тяговой лент на участках установки промежуточных приводов ленточных конвейеров, выполненных в виде тяговых контуров.



Рисунок 3 – Структурная схема математической модели совместной работы электродвигателей и гидромуфт

**В третьем разделе** представлены результаты исследования и установлены закономерности совместной работы приводов ленточных конвейеров при наличии случайных отклонений механических характеристик их электродвигателей. Обоснована методика выбора рациональных вариантов систем приводов ленточных конвейеров на основе метода анализа иерархий. Выработаны условия, выполнение которых обеспечивает корректное применение предлагаемой методики в процессе выбора рациональных вариантов технических объектов. В соответствии с выработанными условиями предложен адаптивный комплекс критериев эффективности систем приводов ленточных конвейеров, включающий эксплуатационные, эргономические, временные и экономические критерии, а также соответствующая ему структура иерархии. Предложен комплекс проектных мер, реализующих рациональную компоновку систем приводов на основе полученных закономерностей с учетом критериев их эффективности.

Для изучения закономерностей совместной работы приводов ленточных конвейеров была исследована обобщенная типовая схема системы приводов с построением вероятностных математических моделей. Установленные при этом системные закономерности можно представить в виде следующих положений:

- наилучшими с позиции распределения тяговых усилий являются сочетания с одинаковыми отклонениями скольжения двигателей всех приводов, причем общее «смягчение» механических характеристик приводит к более равномерному распределению тяговых усилий;
- в случае наличия в системе одного двигателя со «смягченной» механической характеристикой его установка в структуру промежуточного ленточного привода может привести к работе последнего в режиме сопротивления движению грузонесущей ленты,

т.к. при синхронизации скоростей контуров лент указанный привод будет развивать недостаточное тяговое усилие для преодоления сопротивлений движению собственного тягового контура (дотационный режим работы);

- при наличии в системе нескольких двигателей со «смягченными» механическими характеристиками и нескольких с «жесткими», а также реализации в структуре системы приводов одного конвейера как барабанных, так и промежуточных ленточных приводов наилучшее распределение тяговых усилий достигается в случае установки двигателей с «жесткими» характеристиками в структуры промежуточных ленточных приводов, что также можно сформулировать в виде следующего принципа: чем большую нагрузку возьмут на себя промежуточные ленточные приводы, тем меньшее количество из них будет работать в дотационном режиме;

- наибольшую опасность представляют сочетания отклонений скольжения, внутри которых имеется только один двигатель с «жесткой» механической характеристикой; в этом случае он пытается воспринять основной спектр нагрузок при возможном снижении общей синхронизирующей скорости движения лент конвейера; данное обстоятельство может привести к перегрузке двигателя по мощности и срыву сцепления лент на промежуточных приводах;

- грузонесущая лента работает в спектре максимальных значений собственного натяжения в случаях восприятия наименьшей нагрузки приводами любых типов, взаимодействующими с грузовой ветвью конвейера, что соответствует наличию у двигателей данных приводов «смягченных» механических характеристик по отношению к двигателям других приводов; наиболее опасный вид данная закономерность принимает в случае установки в структуре конвейера промежуточных ленточных приводов, взаимодействующих с грузонесущей лентой, т.к. данные приводы могут одновременно работать в дотационном режиме;

- в случаях восприятия значительных нагрузок промежуточными ленточными приводами при работе их двигателей на «жестких» механических характеристиках общая работоспособность системы сохраняется за счет повышения натяжений соответствующих тяговых лент; сохранить работоспособное состояние системы при первоначальных значениях всех входных параметров в рассматриваемых условиях невозможно.

Для подтверждения адекватности вероятностной математической модели было проведено сравнение результатов моделирования с данными испытаний многоприводного конвейера конструкции ВНИИПТМАШ, установленного на песчаном карьере Тучковского комбината строительных материалов (1969 – 1970 г.г.). Выбор объекта обоснован как наличием в открытом доступе (труды ВНИИПТМАШ) результатов испытаний, так и несовершенством применяемых в указанный период времени систем управления приводами, что позволило подтвердить рекомендации по выбору значений коэффициента надежности по механической характеристике поставляемых электродвигателей и определению степени точности тягового расчета в зависимости от типов применяемых систем управления.

Установленные закономерности непосредственно влияют на принимаемые проектные решения, формируя комплекс конструктивных ограничений сравниваемых вариантов исполнения систем приводов ленточных конвейеров. Применяемые при этом методы принятия решений сводятся к оценке каждого варианта с помощью критериев эффективности. В проведенных ранее исследованиях автором была разработана методика выбора рациональных вариантов систем приводов ленточных конвейеров на основе метода анализа иерархий, как одного из наиболее прогрессивных и взвешенных методов принятия решений. При этом данная методика требует более глубокой адаптации к объекту исследования, а именно разработки и обоснования принципов взаимодействия критериев друг с другом с целью устранения возможностей принятия ошибочных решений.

В работе обоснован ряд условий, выполнение которых обеспечивает корректное применение рассматриваемой методики в процессе выбора рациональных вариантов технических объектов. В соответствии с данными условиями предложен адаптивный комплекс критериев эффективности систем приводов ленточных конвейеров, включающий эксплуатационные, эргономические, временные и экономические критерии, а также соответствующая ему структура иерархии.

На основе установленных закономерностей совместной работы приводов ленточных конвейеров при наличии случайных отклонений механических характеристик их электродвигателей, а также с учетом критериев их эффективности предложен комплекс проектных мер, реализующих рациональную компоновку систем приводов.

**В четвертом разделе** представлены результаты экспериментальных исследований поведения сыпучего груза при осуществлении перегрузочных процессов, что актуально для промежуточных барабанных приводов типа «ложный сброс». Разработана принципиальная схема и создана натурная конструкция экспериментального стенда для исследования влияния конструкции промежуточного ленточного привода ленточного конвейера на его рабочие процессы, защищенная патентом РФ. Разработана методика и приведены результаты исследований поведения промежуточных ленточных приводов с применением стенда. Описана конструкция установки, разработана методика проведения, и приведены результаты экспериментальных исследований особенностей работы электрического привода в виде обобщенного приводного механизма подъемно-транспортной машины в продолжительных режимах включения, соответствующих режимам работы ленточных конвейеров, с применением преобразователей частоты и на естественных механических характеристиках.

Поведение сыпучего груза при истечении из загрузочных устройств было изучено на основе приемного ленточного передвижного бункера-питателя СПКБ 12-4 производства ООО «Конвейер» г. Брянск (рисунок 4).



Рисунок 4 – Приемный ленточный передвижной бункер-питатель СПКБ 12-4



Рисунок 5 – Конструкция экспериментального стенда

Проведенные натурные исследования процесса истечения груза через каскад выпускных отверстий позволили установить ряд важных закономерностей. Экспериментально определен коэффициент истечения груза (гранулированной серы) через каскад выпускных отверстий при рекомендуемых проектных справочных значениях  $0,3 \dots 0,5$  (при истечении через единичное отверстие бункера) фактически снижен в  $1,75 \dots 3$  раза. Переход груза из влажного в сухое состояние (коэффициент истечения изменяется от значения  $0,162$  до величины  $0,171$ ) привел к увеличению производительности конвейера на  $5,5\%$  от номинальной величины и пересыпанию груза. Таким образом, незначительное изменение коэффициента истечения, вызванное несущественными прогнозируемыми колебаниями параметров внешних условий эксплуатации конвейера, может приводить к значительным

изменениям сопротивлений движению лент и непрогнозируемым аварийным ситуациям, что необходимо учитывать при проведении тягового расчета.

Для изучения особенностей работы промежуточных ленточных приводов была разработана принципиальная схема и создана натурная конструкция экспериментального стенда (рисунок 5). Стенд включает два замкнутых контура лент – верхний и нижний. Нижний контур является приводным и моделирует работу промежуточного ленточного привода. Верхний контур является ведомым, при этом его нижняя ветвь взаимодействует с приводным нижним контуром, моделируя работу грузовой ветви грузонесущей ленты конвейера.

Исследование тепловой картины взаимодействия лент проводилось с использованием тепловизора Fluke Ti40. Исследование проводилось с учетом рекомендаций РД 13-04-2006 «Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах».

Установлено, что сцепление тяговой и грузонесущей лент в зоне контакта неравномерно по их ширине (рисунок 6). Выделяется ряд преимущественных продольно ориентированных зон контакта, расположение которых в поперечной ориентации соответствует точкам контакта сечения лент с ребрами роликов поддерживающих роликостропов. Данный эффект можно учесть при расчетах введением процедуры дифференцирования коэффициента сцепления лент и его приведения к усредненному значению по их ширине.

Картину распределения преимущественных зон контакта и соответствующих им значений коэффициента сцепления лент можно представить в виде обобщенной диаграммы (рисунок 7), в которой в качестве опорных точек расположения данных зон определены боковые грани роликов и возможные точки опоры транспортируемых грузов, выстроенные в зависимости от кусковатости последних. Приведенный коэффициент сцепления лент  $\mu_{np}$  в соответствии с обобщенной диаграммой распределения преимущественных зон контакта по ширине лент определяется зависимостью

$$\mu_{np} = 2b_l \left( \frac{1}{a'} + \frac{n_p}{B} - \frac{1}{B} \right) (\mu_{max} - \mu_{min}) + \mu_{min}, \quad (8)$$

где  $B$  – наименьшая ширина какой-либо ленты в зоне контакта;  $a'$  – средний размер типичного куса транспортируемого груза;  $n_p$  – количество роликов в поддерживающей роликостропе верхней ветви конвейера;  $b_l$  – толщина грузонесущей ленты;  $\mu_{max}$  и  $\mu_{min}$  – соответственно максимально и минимально возможные значения коэффициента сцепления лент в конкретной проектной ситуации.

Данная зависимость справедлива, если выполняется условие

$$a' \geq \frac{2Bb_l}{B - 2b_l(n_p - 1)}. \quad (9)$$

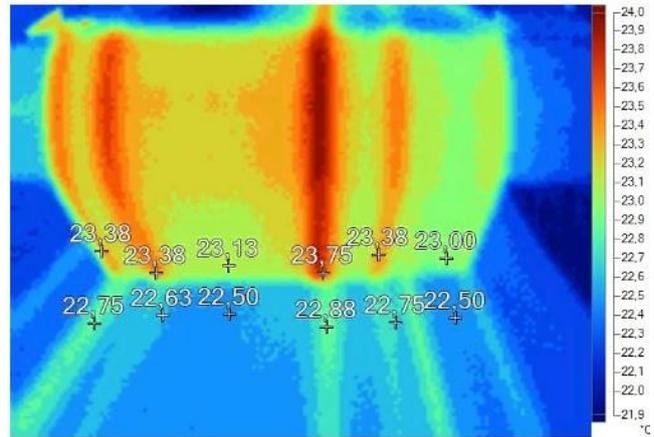


Рисунок 6 – Тепловая картина поперечного взаимодействия лент верхнего и нижнего контуров экспериментального стенда

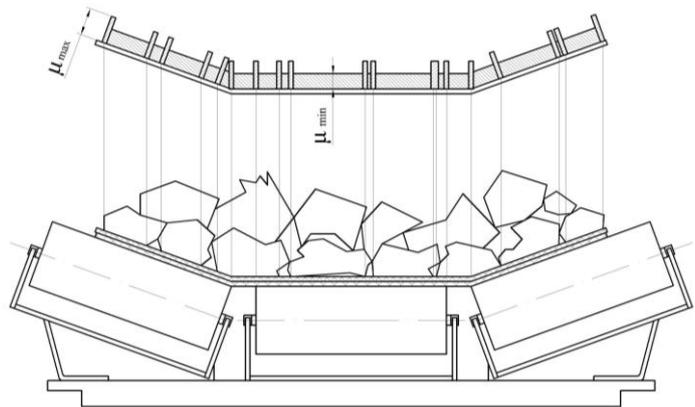


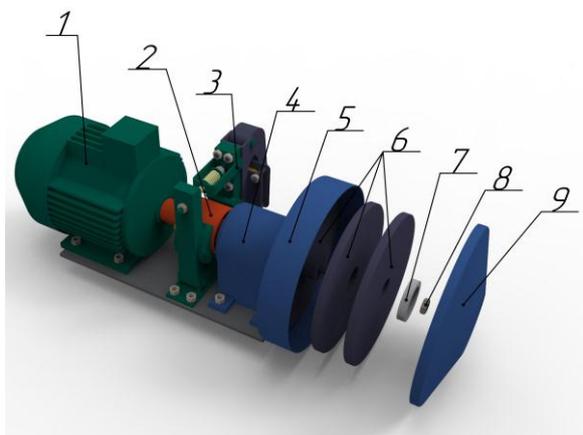
Рисунок 7 – Обобщенная диаграмма распределения преимущественных зон контакта по ширине лент в привязке к роликостропе верхней ветви

В противном случае следует принять  $\mu_{np} = \mu_{max}$ . Если в момент анализа тяговой способности промежуточного ленточного привода на грузонесущей ленте отсутствует груз (холостой ход конвейера), коэффициент  $\mu_{np}$  будет определяться выражением

$$\mu_{np} = 2b_l \left( \frac{n_p}{B} - \frac{1}{B} \right) (\mu_{max} - \mu_{min}) + \mu_{min}. \quad (10)$$

Экспериментальное исследование особенностей работы электрического привода в виде обобщенного приводного механизма подъемно-транспортной машины в продолжительных режимах включения, соответствующих режимам работы ленточных конвейеров, с применением преобразователей частоты и на естественных механических характеристиках проводилось с помощью установки, представленной на рисунке 8. Тепловой контроль также производился с использованием тепловизора Fluke Ti40.

а)



б)



*а – механизм экспериментальной установки; б – преобразователь частоты «Веспер» Е2-8300-002Н*

*1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – тормоз; 4 – подшипниковая опора;  
5 – защитный кожух; 6 – диски; 7 – гайка; 8 – контргайка;  
9 – торцевая крышка*

Рисунок 8 – Конструкция экспериментальной установки

В результате исследований установлено, что при применении частотного преобразователя температурный режим продолжительной работы электродвигателя (значения минимальной, средней и максимальной температуры корпуса электродвигателя) на пониженных частотах тока в сети соответствует температурному режиму работы электродвигателя на естественных механических характеристиках без применения преобразователя частоты. При этом при ухудшенных начальных условиях проведения испытаний (повышенная температура окружающей среды) при применении частотного преобразователя по истечении контрольного периода (1 час) наблюдается более низкий уровень минимальной, средней и максимальной температур корпуса по сравнению с работой двигателя на естественной характеристике.

На основе исследования подтверждена корректность рекомендаций по учету типа системы управления приводами при построении вероятностных математических моделей распределения тяговых усилий.

**В пятом разделе** представлен разработанный метод дифференциального тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров. Метод позволяет варьировать степень точности его проведения в зависимости от целей расчета и уникальности структур систем приводов.

В основе метода лежит концепция представления структурных элементов процесса тягового расчета в виде трех взаимосвязанных классифицирующих признаков «принцип распределения тяговых усилий между приводами (m1) – особенности конструкции приводов (m2) – принцип определения сопротивлений передвижению ленты (m3)». Данную концепцию можно представить в виде графа (рисунок 9).

В структуру графа включены следующие признаки: m1.1 – тяговые усилия распределяются пропорционально тяговым факторам приводов; m1.2 – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов при их номинальных значениях; m1.3 – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов и их возможных отклонений; m1.4 – тяговые усилия распределяются пропорционально сопротивлениям соответствующих участков трассы конвейера; m1.5 – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов при их номинальных значениях и продольного растяжения ленты; m1.6 – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов, их возможных отклонений и продольного растяжения ленты; m2.1 – конструкция системы приводов предусматривает наличие дополнительных изгибов грузонесущей ленты на промежуточных приводах; m2.2 – конструкция системы приводов предусматривает отсутствие дополнительных изгибов грузонесущей ленты на промежуточных приводах; m3.1 – сопротивления движению ленты конвейера определяются приближенным тяговым расчетом; m3.2 – сопротивления движению ленты конвейера определяются подробным тяговым расчетом с

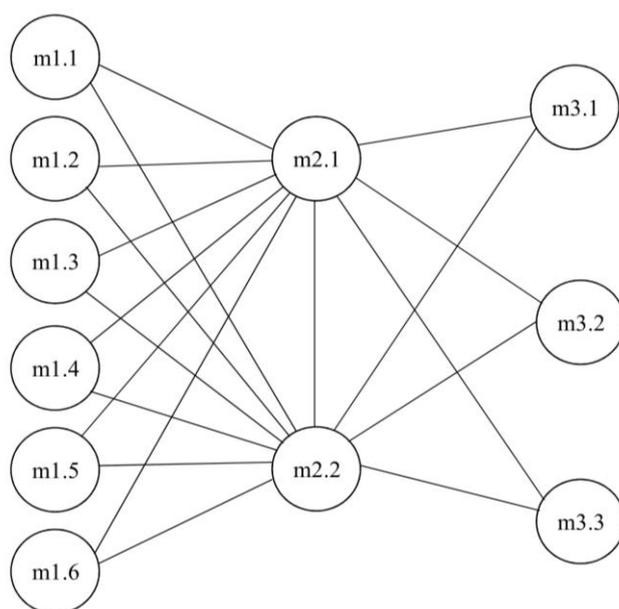


Рисунок 9 – Граф взаимодействия факторов, определяющих тяговый расчет ленточных конвейеров

Узлы графа представляют следующие факторы: m1.1 – тяговые усилия распределяются пропорционально тяговым факторам приводов; m1.2 – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов при их номинальных значениях; m1.3 – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов и их возможных отклонений; m1.4 – тяговые усилия распределяются пропорционально сопротивлениям соответствующих участков трассы конвейера; m1.5 – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов при их номинальных значениях и продольного растяжения ленты; m1.6 – тяговые усилия распределяются с учетом механических характеристик приводов, их возможных отклонений и продольного растяжения ленты; m2.1 – конструкция системы приводов предусматривает наличие дополнительных изгибов грузонесущей ленты на промежуточных приводах; m2.2 – конструкция системы приводов предусматривает отсутствие дополнительных изгибов грузонесущей ленты на промежуточных приводах; m3.1 – сопротивления движению ленты конвейера определяются приближенным тяговым расчетом; m3.2 – сопротивления движению ленты конвейера определяются подробным тяговым расчетом с

обходом трассы конвейера при постоянном значении коэффициента сопротивления движению;  $m3.3$  – сопротивления движению ленты конвейера определяются подробным тяговым расчетом с обходом трассы конвейера с дифференцированным подходом к определению коэффициента сопротивления движению на каждом участке трассы конвейера.

Каждому элементу графа соответствует собственное математическое описание, фактически представляющее собой набор базовых структурных элементов, из которых проектировщик составляет уникальную методику тягового расчета для своего проектного случая. Дополнительно установлены особенности применения данного метода для ленточных конвейеров с системами приводов различной конфигурации.

**В шестом разделе** представлен ряд научно обоснованных запатентованных технических решений по совершенствованию конструкций натяжных устройств многоприводных ленточных конвейеров и методик их диагностирования.

С учетом результатов проведенных исследований предложены конструкции компактных винтовых и полиспастно-винтовых натяжных устройств с применением электроцилиндров и мотор-редукторов, встраиваемых в общую систему управления конвейером. Разработан ряд конструкций автоматизированных тележечных дифференциальных натяжных устройств промежуточных приводов, работа которых основана на автоматическом изменении хода натяжного устройства (реализации требуемого натяжения) в зависимости от сигнала, получаемого от динамометрических устройств, совмещенных с конструкциями верхних роlikоопор. Получено 7 патентов РФ на полезную модель.

На основе проведенных экспериментальных исследований сформулированы базовые положения и предложена поэтапная общая методика теплового диагностирования ленточных конвейеров, включающая акцентированное описание особенностей проведения теплового контроля различных узлов многоприводных ленточных конвейеров, а также возможные сопутствующие профилактические и ремонтные мероприятия, проводимые по результатам контроля.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Совокупность новых научно обоснованных математических моделей, методик и метода дифференциального тягового расчета, разработанных в ходе диссертационного исследования, представляет собой дальнейшее развитие элементов теории проектирования многоприводных ленточных конвейеров и вносит вклад в решение актуальной научно-технической проблемы повышения их экономичности и эффективности за счет существенного расширения возможностей проектного анализа и синтеза. Проведенные исследования позволили сделать следующие основные выводы.

1 Разработана вероятностная математическая модель распределения тяговых усилий внутри систем приводов ленточных конвейеров, обеспечивающая повышенную точность их определения в любом случайном сочетании барабанных

и ленточных приводов в структуре одного конвейера. Вероятностная математическая модель учитывает допустимые нормативными документами и нерегламентированные случайные возможные отклонения скольжения электродвигателей приводов с учетом предварительного прогнозирования качества их исполнения, тип применяемой системы управления работой приводов, влияние продольного растяжения грузонесущей и тяговых лент на распределение тяговых усилий внутри системы приводов конвейера. На основе созданной вероятностной математической модели установлено, что в зависимости от сочетания отклонений скольжения электродвигателей приводов коэффициенты асимметрии цикла перемены напряжений, действующих в ленте, могут существенно отличаться (до 100 % и более относительно наименьшего из значений). При этом ресурс стыкового соединения грузонесущей ленты в наиболее благоприятном сочетании отклонений скольжения в зависимости от величины предела неограниченной выносливости может превышать в 20...28 раз ресурс в наименее благоприятном сочетании.

2 Разработана математическая модель совместной работы электродвигателей и гидромуфт в структуре приводов ленточных конвейеров, учитывающая возможные отклонения их скольжения от номинальных значений, позволяющая формировать аналитическое описание функции механической характеристики совместной работы электродвигателя и гидромуфты, отражающей изменение момента, развиваемого турбинным колесом гидромуфты, в зависимости от частоты его вращения. Установлено, что представление указанной механической характеристики в виде гиперболической функции значительно повышает точность анализа поведения многоприводного конвейера, оборудованного гидромуфтами, в ситуации последовательного отказа приводов. При этом совместное применение в структуре привода электродвигателя и гидромуфты уменьшает возможное отклонение скольжения двигателя на 10...15 % от его номинального значения при общем смягчении механической характеристики их совместной работы.

3 Обоснована методика выбора рациональных вариантов систем приводов ленточных конвейеров на основе метода анализа иерархий. Выработаны условия, выполнение которых обеспечивает корректное применение предлагаемой методики в процессе выбора рациональных вариантов технических объектов, а именно:

- в структуру иерархии не должны включаться критерии, имеющие одинаковые шкалы оценок, в случае применения фиксированных значений критериев для сравниваемых вариантов;

- при сравнении однозначно определенных значений вариантов в рамках каждого критерия (в случае с техническими объектами – однозначно установленных значений их характеристик) на любом уровне иерархии приоритет любого сравниваемого варианта в рамках рассматриваемого критерия определяется отношением значения этого варианта по данному критерию к сумме значений всех сравниваемых вариантов по этому же критерию;

- при сравнении критериев и групп критериев их приоритеты в рамках каждого слота или уровня иерархии целесообразно определять попарным

сравнением друг с другом, учитывая «индивидуальные отношения» критериев или групп критериев между собой.

В соответствии с выработанными условиями предложен адаптивный комплекс критериев эффективности систем приводов ленточных конвейеров, включающий эксплуатационные, эргономические, временные и экономические критерии, а также соответствующая ему структура иерархии.

4 Комплексный анализ различных структур систем приводов ленточных конвейеров с использованием вероятностной математической модели позволил установить ряд закономерностей их проектирования, на основе которых разработана система внутренних сочетаний отклонений скольжения электродвигателей для многодвигательных приводов ленточных конвейеров, обязательных для анализа при проведении процедуры дифференциального тягового расчета. Получены зависимости для определения необходимого количества сочетаний при проектировании. Установлено, что при одном и том же количестве двигателей, применяемых в системе приводов ленточного конвейера, их концентрирование в структуре одного привода значительно облегчает прогнозирование поведения всей системы по отношению к случаю их распределения по разным приводам (при применении двух двигателей в системе приводов трудоемкость моделирования уменьшается в 3 раза, при применении четырех двигателей в 27 раз). Предложен комплекс проектных мер, реализующих рациональную компоновку систем приводов на основе полученных закономерностей с учетом критериев их эффективности.

5 Проведенные натурные исследования процесса истечения груза через каскад выпускных отверстий позволили установить ряд важных закономерностей. Экспериментально определен коэффициент истечения груза (гранулированной серы) через каскад выпускных отверстий при рекомендуемых проектных справочных значениях 0,3...0,5 (при истечении через единичное отверстие бункера) фактически снижен в 1,75...3 раза. Переход груза из влажного в сухое состояние (коэффициент истечения изменяется от значения 0,162 до величины 0,171) привел к увеличению производительности конвейера на 5,5 % от номинальной величины и пересыпанию груза. В конкретизированной формулировке можно констатировать, что незначительное изменение коэффициента истечения, вызванное несущественными прогнозируемыми колебаниями параметров внешних условий эксплуатации конвейера, может приводить к значительным изменениям сопротивлений движению лент и непрогнозируемым аварийным ситуациям. При этом коэффициент истечения груза через каскад выпускных отверстий в любой проектной ситуации должен экспериментально определяться как функция двух независимых групп параметров: геометрических характеристик каскада отверстий и самого бункера, а также ряда свойств груза (влажности, подвижности и связности частиц, липкости, смерзаемости и слеживаемости). Конкретные аргументы функции формируются условиями проектирования.

6 Разработана принципиальная схема и создана натурная конструкция экспериментального стенда для исследования влияния конструкции

промежуточного ленточного привода ленточного конвейера на его рабочие процессы, защищенная патентом РФ. Экспериментально установлено, что сцепление тяговой ленты промежуточного ленточного привода и грузонесущей ленты в зоне контакта неравномерно по их ширине. Выделяется ряд преимущественных продольно ориентированных зон контакта, расположение которых в поперечной ориентации соответствует точкам контакта сечения лент с ребрами роликов поддерживающих роликоспор (разность температур указанных визуально идентифицируемых зон контакта после 10 минут непрерывной работы для грузонесущей ленты составила 0,75...0,87 °С, для тяговой ленты – 0,38...0,5 °С; после 140 минут непрерывной контактной работы разность температур исследуемых зон для грузонесущей ленты возросла до 1,5...2 °С, для тяговой ленты – до 1...1,6 °С). Ширина каждой поперечной температурной зоны на всем протяжении эксперимента соразмерна толщине применяемых лент. На основе экспериментально выявленного эффекта неравномерности сцепления лент в зоне их контакта предложена методика определения расчетного приведенного значения коэффициента сцепления лент в поперечной ориентации.

7 Экспериментально исследованы особенности работы электрического привода в виде обобщенного приводного механизма подъемно-транспортной машины в продолжительных режимах включения, соответствующих режимам работы ленточных конвейеров, с применением преобразователей частоты и на естественных механических характеристиках. Установлено, что при применении частотного преобразователя температурный режим (25...40 °С) продолжительной работы электродвигателя (значения минимальной, средней и максимальной температуры корпуса электродвигателя) на пониженных частотах тока в сети (20, 30, 40 Гц) соответствует температурному режиму (27...40 °С) работы электродвигателя на естественных механических характеристиках (50 Гц) без применения преобразователя частоты. При этом температура полумуфты, работающей на валу двигателя, возрастает соразмерно температуре корпуса электродвигателя (на 10...15 °С при проведении эксперимента на временном интервале 0...60 минут). Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о необходимости учета рабочей температуры электродвигателя в продолжительном режиме включения в качестве входного параметра при выборе типоразмеров быстроходных муфт приводов ленточных конвейеров как при применении преобразователей частоты, так и при работе двигателей на естественных механических характеристиках. На основе исследования подтверждена корректность рекомендаций по учету типа системы управления приводами при построении вероятностных математических моделей распределения тяговых усилий.

8 На основе созданных математических моделей и проведенных экспериментальных исследований разработан метод дифференциального тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров, позволяющий варьировать степень точности его проведения в зависимости от целей расчета и уникальности структур систем приводов. Метод реализует концепцию тягового

расчета, основанную на представлении структурных элементов процесса тягового расчета в виде трех взаимосвязанных классифицирующих признаков «принцип распределения тяговых усилий между приводами – особенности конструкции приводов – принцип определения сопротивлений передвижению ленты» с соответствующим математическим описанием. Установлены особенности применения данного метода для ленточных конвейеров с системами приводов различной конфигурации.

9 На основе разработанных математических моделей предложен способ определения зон относительного скольжения и покоя грузонесущей и тяговой лент на участках установки промежуточных приводов ленточных конвейеров, выполненных в виде тяговых контуров. Установлено, что тяговые расчеты без вычисления протяженности зон относительного покоя и скольжения лент и с вычислением дают сопоставимые по точности результаты, однако расчет без учета зон менее трудоемок, что позволяет судить о целесообразности его использования на предварительных этапах проектирования систем приводов ленточных конвейеров при определении их базовых параметров. При этом тяговый расчет с учетом зон относительного покоя и скольжения лент целесообразно проводить для выбранного к реализации варианта системы приводов, так как особенности данного расчета позволяют избежать лишних затрат и повысить эффективность конструкции еще на стадии проектирования.

10 На основе предлагаемых математических моделей и проведенных экспериментальных исследований с учетом метода дифференциального тягового расчета разработаны и научно обоснованы технические решения ряда дифференциальных натяжных устройств многоприводных ленточных конвейеров, защищенные патентами РФ на полезную модель (получено 7 патентов). На основе проведенных экспериментальных исследований сформулированы базовые положения и предложена поэтапная общая методика теплового диагностирования ленточных конвейеров, включающая акцентированное описание особенностей проведения теплового контроля различных узлов многоприводных ленточных конвейеров, а также возможные сопутствующие профилактические и ремонтные мероприятия, проводимые по результатам контроля.

11 Разработанные математические модели, метод и методики, а также практические рекомендации используются: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»; ООО «Научно - исследовательский институт автоматики, телемеханики и метрологии» (г. Брянск) при выборе типов двигателей и систем управления последовательными конвейерными линиями и другими механизмами с синхронизированной работой; ОАО «Кузбассгипрошахт» (г. Кемерово) при проектировании систем приводов многоприводных ленточных конвейеров.

12 Результаты проведенных исследований дают начало следующим основным научным направлениям изучения ленточных конвейеров:

- развитие методов тепловой диагностики работы различных устройств ленточных конвейеров с учетом современного уровня развития средств диагностики;

- развитие метода дифференциального тягового расчета многоприводных ленточных конвейеров на основе накопления статистических данных работы конвейеров и обоснования выбора значений базовых и корректирующих коэффициентов метода;
  - исследование влияния существующих и вновь разрабатываемых типов систем управления приводами и их настроек на работу конвейерных установок;
  - развитие методов оценки риска применения многоприводных ленточных конвейеров на основе вероятностного прогнозирования их работы, в том числе возможных аварийных ситуаций;
  - исследование закономерностей эксплуатации промежуточных ленточных приводов ленточных конвейеров с учетом возможных дефектов их монтажа, в том числе механизмов износа тяговой и грузонесущей лент в зоне их контакта;
- развитие методов принятия решений в области проектирования ленточных конвейеров с системами приводов различной конфигурации.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

*а) в изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук*

1 Гончаров, К.А. Проектирование загрузочного бункера приемного ленточного передвижного бункера-питателя СПКБ 12-4 / К.А. Гончаров, В.Н. Ивченко // Подъемно-транспортное дело, 2013. – № 4. – С. 2–5.

2 Гончаров, К.А. Определение параметров тягового каната механизма изменения вылета стрелы мобильного телескопического ленточного погрузчика / К.А. Гончаров, В.П. Дунаев, А.А. Бабаев // Вестник Брянского государственного технического университета, 2015. – №1. – С.4–9.

3 Гончаров, К.А. Особенности динамического анализа механизма передвижения подвесной грузовой тележки мостового крана с линейным приводом / К.А. Гончаров, И.А. Денисов, Е.И. Ильин // Вестник Брянского государственного технического университета, 2016. – №3. – С.115–122.

4 Гончаров, К.А. Вероятностный подход к определению отклонений скольжения электродвигателей приводов ленточных конвейеров / К.А. Гончаров // Приводы и компоненты машин, 2016. – № 4–5. – С. 13–16.

5 Гончаров, К.А. Экспериментальное исследование влияния натяжения тяговой и грузонесущей лент на тяговую способность промежуточного привода ленточного конвейера / К.А. Гончаров, А.В. Гришин // Вестник Брянского государственного технического университета, 2018. – №6 (67). – С.58–69.

6 Гончаров, К.А. Система сочетаний отклонений скольжения электродвигателей при вероятностном моделировании распределения тяговых усилий в многодвигательных приводах ленточных конвейеров [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2019. – №3. – С.288–295. – Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

7 Гончаров, К.А. Экспериментальное исследование температурных режимов продолжительной работы электропривода подъемно-транспортных машин [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2019. – №3. – С.296–302. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

8 Гончаров, К.А. Анализ взаимодействия грузонесущей и тяговой лент промежуточного привода ленточного конвейера [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2019. – №4. – С.426–432. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

9 Гончаров, К.А. Установление закономерностей совместной работы приводов ленточного конвейера при наличии случайных отклонений скольжения их электродвигателей [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2020. – №2. – С.218–229. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

10 Гончаров, К.А. Нагруженность грузонесущей и тяговых лент многоприводного ленточного конвейера при наличии случайных отклонений скольжения электродвигателей приводов [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2020. – №3. – С.355–364. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

11 Гончаров, К.А. Математическая модель работы отвальных ленточных конвейеров мобильных строительных и дорожных машин при следящем управлении натяжением лент [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров, А.В. Гришин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2020. – №3. – С.365–376. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

12 Гончаров, К.А. Экспериментальное исследование теплового режима работы мотор-барабана короткого ленточного конвейера [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров, А.В. Гришин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2020. – №4. – С.529–538. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

***б) публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science***

13 Goncharov K.A. A mathematical model of the distribution of tractive efforts between drives of a belt conveyor with hydraulic couplings at their failure [Text] / Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2015). – P. 7414886. Режим доступа: <https://www.scopus.com>.

14 Goncharov K.A., Grishin A.V. Theoretical study of influence of belt tension of intermediate belt conveyor drive on value of zone of relative slip of traction and carrying belts [Text] // IOP Conf Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 87 (2017). – P. 022008. Режим доступа: <https://www.scopus.com>.

15 Goncharov K.A., Denisov I.A. Maintenance of working capacity of movement mechanism of load trolley with linear traction electric drive of bridge type crane [Text] // IOP Conf Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 87 (2017). – P. 062004. Режим доступа: <https://www.scopus.com>.

16 Goncharov K.A., Grishin A.V. Synthesis of main parameters and experimental approbation of test bench for study of working processes of intermediate belt conveyor drive [Text] // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering.

Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer Nature Switzerland AG 2019 p. – 2097 – 2105. Режим доступа: <https://www.scopus.com>.

**в) патенты**

17 Пат. 177247 Рос. Федерация: МПК В65G 23/44. Винтовое натяжное устройство [Текст] / Гончаров К.А., Гришин А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». – № 2017119975; заявл. 06.06.17; опубл. 14.02.18, Бюл. № 5. – 2 с.

18 Пат. 177069 Рос. Федерация: МПК В65G 23/44. Гидравлическое натяжное устройство [Текст] / Гончаров К.А., Гришин А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». – № 2017119951; заявл. 06.06.17; опубл. 07.02.18, Бюл. № 4. – 2 с.

19 Пат. 178190 Рос. Федерация: МПК В65G 23/44. Гидрополиспастное натяжное устройство [Текст] / Гончаров К.А., Гришин А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». – № 2017130034; заявл. 28.04.17; опубл. 26.03.18, Бюл. № 9. – 2 с.

20 Пат. 176564 Рос. Федерация: МПК В65G 23/14. Стенд для исследования параметров управляющего воздействия промежуточного ленточного привода ленточного конвейера [Текст] / Гончаров К.А., Гришин А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». – № 2017115271; заявл. 28.04.17; опубл. 23.01.18, Бюл. № 3. – 2 с.

21 Пат. 185488 Рос. Федерация: МПК В65G 23/44. Лебедочное натяжное устройство [Текст] / Гончаров К.А., Гришин А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». – № 2017118627; заявл. 29.05.17; опубл. 06.12.18, Бюл. № 34. – 2 с.

22 Пат. 189350 Рос. Федерация: МПК В65G 23/44. Полиспастно-винтовое натяжное устройство [Текст] / Гончаров К.А., Гришин А.В., Дунаев В.П.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». – № 2018101829; заявл. 17.01.18; опубл. 21.05.19, Бюл. № 15. – 2 с.

23 Пат. 189363 Рос. Федерация: МПК В65G 23/44. Полиспастно-винтовое натяжное устройство [Текст] / Гончаров К.А., Гришин А.В., Дунаев В.П.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». – № 2018101832; заявл. 17.01.18; опубл. 21.05.19, Бюл. № 15. – 2 с.

24 Пат. 186024 Рос. Федерация: МПК В65G 33/00. Винтовое натяжное устройство [Текст] / Гончаров К.А., Гришин А.В., Дунаев В.П.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». – № 2018101827; заявл. 09.04.18; опубл. 26.12.18, Бюл. № 36. – 2 с.

**з) монографии**

25 Гончаров, К.А. Тяговый расчет многоприводных ленточных конвейеров [Текст]+[Электронный ресурс]: монография / К.А. Гончаров. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2021. – 271 с.

26 Лагерев, А.В. Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров [Текст]: монография / А.В. Лагерев, Е.Н. Толкачев, К.А. Гончаров. – Брянск: РИО БГУ, 2017. – 384 с.

**д) публикации в других научных изданиях**

27 Гончаров, К.А. Подход к тяговому расчету многоприводных ленточных конвейеров с учетом возможных отклонений механических характеристик двигателей приводов [Текст] / К.А. Гончаров // Проведение исследования по приоритетным направлениям современной науки для создания инновационных технологий: Материалы IV региональной научно-практической конференции молодых исследователей и специалистов / под ред. И.Г. Чернышовой. – Брянск: БГТУ, 2012. – С 7.

28 Гончаров, К.А. Принцип конструирования приводных подвесок ленточных конвейеров с подвесной лентой и распределенным приводом [Текст] / К.А. Гончаров, П.В. Бословяк, Д.Ю. Кулешов // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: Материалы IV международной научно-практической конференции / под ред. И.А. Лагерева. – Брянск: БГТУ, 2012. – С. 12–13.

29 Гончаров, К.А. Экспериментальный стенд для исследования движения дискретного участка ленточного конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом [Текст] / К.А. Гончаров, Д.Ю. Кулешов, П.В. Бословяк // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: Материалы IV международной научно-практической конференции / под ред. И.А. Лагерева. – Брянск: БГТУ, 2012. – С. 14.

30 Гончаров, К.А. Определение зон относительного скольжения и покоя грузонесущей и тяговой лент при использовании промежуточных приводов ленточных конвейеров [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2015. – №2. – С.31–36. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

31 Гончаров, К.А. Обоснование методики выбора рациональных вариантов систем приводов ленточных конвейеров на основе метода анализа иерархий [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2016. – №2. – С.66–70. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

32 Гончаров, К.А. Универсальная компоновочная схема металлоконструкции грузовой тележки крана мостового типа [Текст] / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2017. – №1. – С.60–66. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

33 Гончаров, К.А. Экспериментальный стенд для исследования влияния конструкции промежуточного ленточного привода ленточного конвейера на его рабочие процессы [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров, А.В. Гришин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2017. – №1. – С.52–59. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

34 Гончаров, К.А. Комплексная математическая модель функциональной эффективности грузоподъемного крана [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2017. – №4. – С.389–399. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

35 Гончаров, К.А. Влияние натяжения грузонесущей ленты на тяговую

способность промежуточного привода ленточного конвейера [Текст] / К.А. Гончаров, А.В. Гришин // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: Материалы III Всерос. науч.-практ. конф. (2–3 окт., 2017 г., г. Брянск) / под ред. К.А. Гончарова. – Брянск: БГТУ, 2017. – С. 26–32.

36 Гончаров, К.А. Экспериментальное исследование влияния дефектов монтажа на тяговую способность промежуточного привода ленточного конвейера [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров, А.В. Гришин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2017. – №3. – С.289–295. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

37 Гончаров, К.А. Экспериментальное исследование нагруженности грузоподъемных машин при использовании систем управления с частотным преобразователем [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2018. – №1. – С.31–39. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

38 Гончаров, К.А. Комплексный подход к тяговому расчету ленточных конвейеров [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров, В.П. Дунаев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2018. – №2. – С.144–151. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

39 Гончаров, К.А. Особенности построения вероятностной математической модели распределения тяговых усилий в многоприводном ленточном конвейере [Текст]+[Электронный ресурс] / К.А. Гончаров // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2018. – №4. – С.380–389. Режим доступа: <https://ntv-brgu.ru>.

40 Гончаров, К.А. Качественные характеристики расчетных случаев при комплексном подходе к тяговому расчету ленточных конвейеров [Текст] / К.А. Гончаров // Энерго-ресурсосберегающие машины, оборудование и экологически чистые технологии в дорожной и строительной отраслях: материалы междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 20–21 сентября 2018 г. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – С. 67–74.

41 Гончаров, К.А. Структуризация комплекса математических моделей распределения тяговых усилий между приводами ленточных конвейеров [Текст] / К.А. Гончаров // Современная наука: идеи, которые меняют мир. Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Брянск, 22–23 ноября 2018 г. – Ч.1. – Брянск: РИСО БГУ, 2018. – С. 77–79.

42 Гончаров, К.А. Устройства безопасности в структурах систем управления многоприводными ленточными конвейерами [Текст] / К.А. Гончаров // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: Материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. (1–2 окт., 2018 г., г. Брянск) / под ред. К.А. Гончарова. – Брянск: БГТУ, 2018. – С. 38–43.

43 Гончаров, К.А. Сравнительный стоимостной анализ комплектаций приводов ленточных конвейеров [Текст] / К.А. Гончаров // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 15–17 октября 2020 г. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. – С. 101–107.

Гончаров Кирилл Александрович

РАЗВИТИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
МНОГОПРИВОДНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

2.5.2. Машиноведение

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

---

Подписано в печать «27» июня 2022 г.  
Объем 2 усл. печ. л.

Заказ № \_\_\_\_  
Тираж 100 экз.

Формат 60x84/16

---