

УДК (UDC) 625.1/5

КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНОПРОЛЕТНОЙ
МОБИЛЬНОЙ КАНАТНОЙ ДОРОГИ МАЯТНИКОВОГО ТИПА НА БАЗЕ
АЭРОМОБИЛЬНЫХ КАНАТНЫХ УСТАНОВОКA COMPLEX MATHEMATICAL MODEL OF A SINGLE-SPAN MOBILE
PENDULUM-TYPE ROPEWAY BASED ON AIRMOBILE ROPE UNITSЛагереv А.В.¹, Лагереv И.А.²
Lagerev A.V.¹, Lagerev I.A.²¹ – Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)² – Кубанский государственный технологический университет (Краснодар, Россия)¹ – Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)² – Kuban State Technological University (Krasnodar, Russian Federation)

Аннотация. Однопролетные мобильные канатные дороги на базе сопряженных единой несущее-тяговой канатной системой двух аэромобильных канатных установок в настоящее время представляют собой новейший тип подвесных канатных дорог, предназначенных для преимущественного использования в сложных природных условиях при отсутствии необходимой наземной транспортной инфраструктуры. В статье рассмотрена проблема разработки комплексной математической модели однопролетной мобильной канатной дороги маятникового типа на базе аэромобильных канатных установок, которая может рассматриваться как основа для дальнейших исследований по созданию цельной научно обоснованной теории данного типа транспортирующего оборудования. Сформулированы методологические принципы создания указанной математической модели, предложена ее структура и дана краткая характеристика внутренних подсистем модели.

Ключевые слова: мобильная канатная дорога, аэромобильная канатная установка, комплексная математическая модель.

Дата получения статьи: 01.08.2024
Дата принятия к публикации: 10.11.2024
Дата публикации: 25.12.2024

Сведения об авторах:

Лагереv Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

Лагереv Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-6831>

Abstract. Single-span mobile ropeways on the basis of two airmobile rope units connected by a single carrying-traction rope system currently represent the newest type of aerial ropeways designed for pre-property use in difficult natural conditions in the absence of the necessary ground transport infrastructure. The article considers the problem of developing a complex mathematical model of a single-span mobile pendulum-type ropeway based on airmobile rope units, which can be considered as a basis for further research on the creation of an integral scientifically based theory of this type of transporting equipment. The methodological principles of creating the specified mathematical model are formulated, its structure is proposed and a brief description of the internal subsystems of the model is given.

Keywords: mobile ropeway, airmobile rope unit, complex mathematical model.

Date of manuscript reception: 01.08.2024
Date of acceptance for publication: 10.11.2024
Date of publication: 25.12.2024

Authors' information:

Alexander V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Professor at I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor at Kuban State Technological University, e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-6831>

1. Введение

Мобильные канатные дороги в настоящее время рассматриваются как один из перспективных видов грузового или грузо-пассажирского транспорта [1]. Хотя опыт использования транспортных канатных технологий имеет многовековую историю [2], в последние десятилетия наблюдается рост интереса к этому виду транспорта [3]. Это связано с развитием в современном мире таких глобальных процессов, как повышение значимости экологических требований при оценке качества функционирования промышленных и социальных объектов или охраняемых природных экосистем, реализация концепции «Умный город», переход к технологиям Индустрии 4.0 применительно к сфере транспорта [4].

В настоящее время канатные транспортные технологии реализуются в виде двух технических концепций – стационарных подвесных канатных дорог и мобильных подвесных канатных дорог. Интерес к мобильным канатным дорогам, прежде всего, к грузовым канатным дорогам, стал заметен преимущественно в последние 10-15 лет. Наиболее разрабатываемой конструкцией мобильных канатных дорог можно считать однопролетные канатные дороги маятникового типа на базе двух сопряженных единой несущей канатной системой мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, каждый из которых представляет собой автономную самоходную колесную машину на специальном шасси высокой проходимости и грузоподъемности [5].

Логическим развитием указанной конструкции является создание мобильных канатных дорог на базе аэромобильных канатных установок, предназначенных для транспортировки всеми современными видами грузового транспорта – автомобильного, воздушного, железнодорожного и водного. Одно из первых технических решений конструктивного исполнения аэромобильных канатных установок содержится в [6].

К числу технических задач, для решения которых при формировании мобильных канатных дорог целесообразно использовать

аэромобильные канатные установки, можно отнести [6]:

- расширение возможности использования мобильной канатной дороги в труднодоступных и (или) в заранее необорудованных местностях со сложным природным рельефом, доступ к которым с помощью известных видов транспорта, кроме воздушно-го, невозможен или весьма проблематичен по причине недопустимых затрат средств или времени (например, в прибрежных зонах Арктики и Приморья, таежных районах Сибири и т.п.);

- существенное снижение финансовых и материальных затрат, сокращение числа эксплуатационного персонала и повышение оперативности развертывания (монтажа и демонтажа) мобильной канатной дороги, существенное снижение издержек на эксплуатацию и техническое обслуживание мобильной канатной дороги во время ее работы;

- повышение надежности эксплуатации мобильной канатной дороги, в частности, повышение таких основных количественных характеристик, как коэффициенты готовности, использования, оперативной готовности и др.

Мобильные канатные дороги на базе аэромобильных канатных установок могут быть реализованы как в виде многопролетных подвесных дорог, так и однопролетных подвесных дорог. Характерное схематичное изображение однопролетной канатной дороги маятникового типа, предложенной в [7], представлено на рис. 1.

В первом случае это позволяет получить достаточно длинную трассу мобильной канатной дороги протяженностью до нескольких километров, но при этом требует использования нескольких промежуточных опорных конструкций для поддержания несущей канатной системы и создания промежуточных площадок для их размещения вдоль трассы. Во втором случае длина трассы мобильной канатной дороги оказывается заметно меньше, составляя не более нескольких сотен метров в горизонтальной плоскости. Однако отсутствие необходимости использования промежуточных опорных конструкций позволяет проводить транспорт-

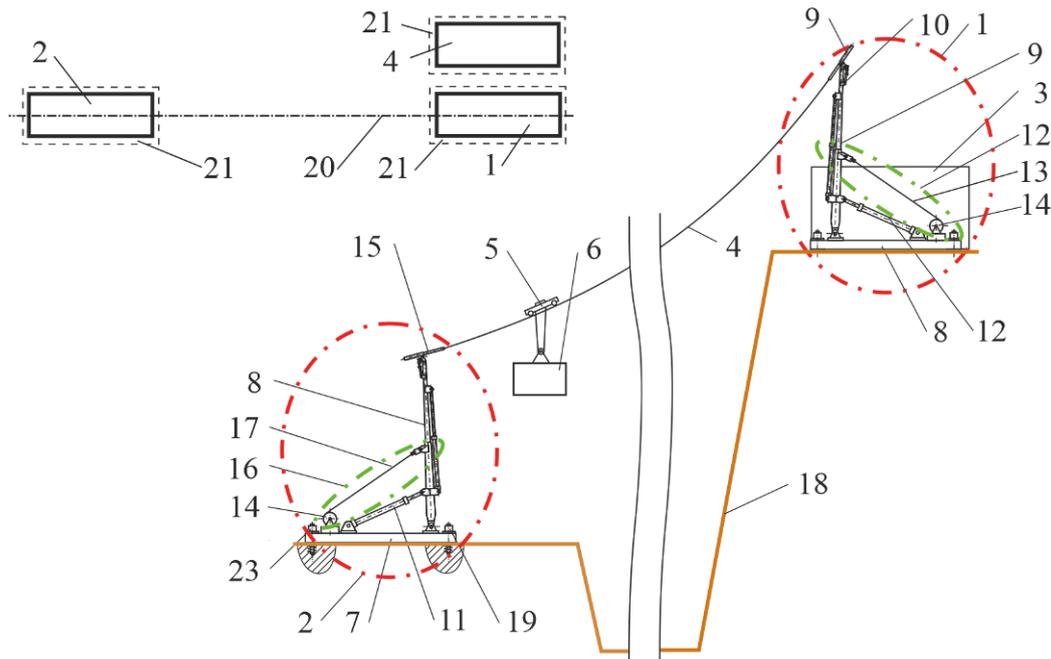


Рис. 1. Схематичное изображение однопролетной канатной дороги маятникового типа на базе аэромобильных канатных установок: 1 - модуль концевой приводной станции; 2 - модуль концевой натяжной станции; 3 - силовой модуль; 4 - несуще-тяговый канат; 5 - прицепное устройство; 6 - транспортируемый груз; 7 - несущая рамная конструкция; 8 - концевая опора; 9 - приводной канатный шкив; 10 - механизм движения; 11 - механизм подъема концевой опоры; 12 - механизм фиксации концевой опоры; 13 - удерживающий канат; 14 - лебедка; 15 - не приводной канатный шкив; 16 - механизм натяжения; 17 - силовой полиспаст; 18 - поверхность грунта; 19 - анкерный аутригер; 20 - продольная ось; 21 - площадка.

ные операции через зоны сложного рельефа (узкие глубокие ущелья, каньоны и овраги, реки и болота и др.) или зоны высокой опасности для перемещения наземных транспортных средств и людей (завалы, разрушения и др.), а также достаточно просто обеспечивать перемещение грузов в условиях резкого перепада высот, характеризующегося углами наклона линии канатной дороги до 50...70°.

2. Постановка задачи

При разработке общей концепции мобильной канатной дороги на базе сопряженных единой несуще-тяговой канатной системой двух аэромобильных канатных установок целесообразно в максимальной степени использовать те подходы и рекомендации, которые были использованы при создании общей концепции мобильной канатной дороги на базе сопряженных единой несуще-тяговой канатной системой двух мобильных

транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базе автономных самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости [5]. Это в полной мере касается выбора схемного решения наиболее работоспособной мобильной канатной дороги из возможных альтернативных вариантов с последующим построением его комплексной математической модели.

В [8] было рассмотрено шесть альтернативных вариантов мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов (рис. 2). Условное обозначение схемного решения однопролетной мобильной канатной дороги было сформировано по следующему принципу: вид организации перемещения груза (К – кольцевое движение или М – маятниковое движение) – тип используемого каната (Н – несущий, Т – тяговый или НТ – несуще-тяговый) – вид трассы (к – кольцевая или л – линейная).

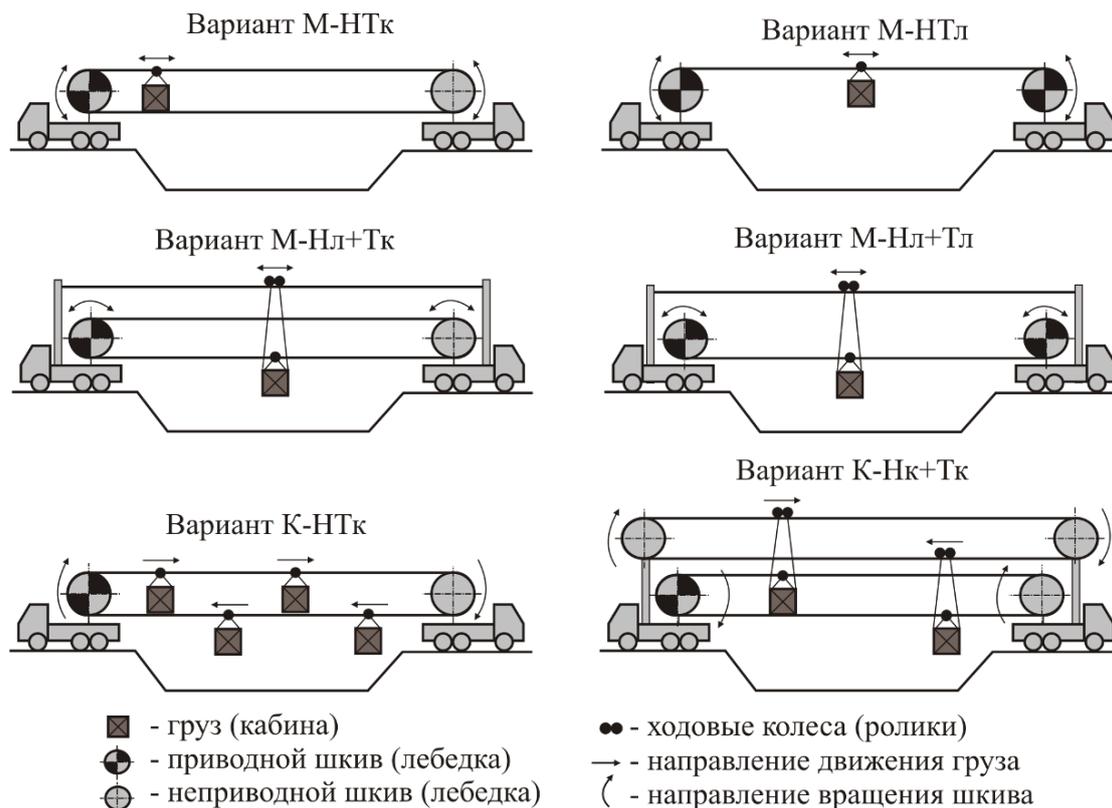


Рис. 2. Альтернативные варианты однопролетных мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов [8]

Для выбора наиболее перспективных вариантов конструктивного исполнения мобильных канатных дорог в [8] был сформулирован ряд специфических требований и ограничений, связанных со специфическими конструктивными и транспортными особенностями мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на колесных шасси. Эти требования и ограничения в целом справедливы и для мобильных канатных дорог на базе аэромобильных канатных установок, однако они должны быть откорректированы с учетом технико-функциональных особенностей указанных канатных дорог. Как результат, учитываемые ограничения принимают следующий вид.

1. Ограничение по суммарному весу основного технологического оборудования, которое может быть размещено на несущей раме аэромобильной канатной установки в транспортном состоянии, исходя из необходимости ее транспортирования к месту развертывания мобильной канатной дороги возможным средством доставки, которое характеризуется минимальными характеристиками

грузоподъемности и габаритных размеров транспортируемого груза. Как показано в [9], таким средством доставки являются вертолеты, поэтому полный вес аэромобильной канатной установки не может превышать 25 т.

2. Ограничение по габаритным размерам аэромобильной канатной установки. Исходя из сформулированного в [10] принципа обеспечения универсальности габаритных размеров аэромобильных канатных установок в транспортном состоянии, продольный габарит установки в рамном или контейнерном исполнении не должен превышать 12 м, а поперечный и вертикальный габариты - 2,4 м, что позволяет ориентироваться на универсальные транспортные контейнеры ИСО серии 1 [11, 12]. Это ограничение лимитирует, в частности, диаметр канатного шкива, который должен составлять не более 2...2,2 м, а также длину концевой опоры и размеры механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем состоянии.

3. Ограничение по суммарному весу транспортируемого груза и грузозахватного устройства. Результаты анализа функцио-

нальных возможностей мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, представленные в [13], показывают, что предельные значения веса при величинах пролета до 200...300 м и углах наклона трассы до 60° составляют ~ 30...40 кН. Учитывая, что тактико-технические характеристики аэромобильных канатных установок объективно не могут превышать тактико-технические характеристики мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, указанные значения веса транспортируемого груза, длины пролета и угла наклона трассы можно принять за максимально возможные и допустимые.

Поэтому руководствуясь методикой и выводами анализа, приведенными в [8], в качестве наиболее работоспособного варианта также следует рассматривать однопролетную одноканатную мобильную канатную дорогу маятникового типа с единой несущо-тяговой канатной системой в виде замкнутого кольцевого несущо-тягового каната с двумя параллельно расположенными ветвями. Дополнительно в качестве еще одного перспективного варианта может рассматриваться вариант М-НТл – однопролетная одноканатная мобильная канатная дорога маятникового типа с единой несущо-тяговой канатной системой в виде закрепленного на синхронно работающих канатных лебедках несущо-тягового каната, формирующего одну транспортную ветвь.

3. Методологические принципы и структура комплексной модели

Реализация общей концепции создания мобильных канатных дорог на базе аэромобильных канатных установок, направленная на создание научно обоснованных основ теории их проектирования и моделирования рабочих процессов на всех стадиях жизненного цикла, требует формирования комплексной математической модели, которая включает в свою структуру частные математические модели и методы синтеза и анализа конструкторских решений механизмов и узлов основного и сопутствующего техноло-

гического оборудования, а также прогнозирования их работоспособности на стадии эксплуатации как единой совокупности взаимоувязанных компонентов. Требование комплексности данной математической модели обусловлена тем, что максимально адекватное математическое отражение такой сложной технической системы, как мобильная канатная дорога может быть достигнута при ее рассмотрении не как суммы отдельных структурно-функциональных компонентов, а с учетом многообразия прямых и обратных связей между ними. Как показано в [14, 15], наличие глубоко разработанной комплексной математической модели также является обязательной предпосылкой для создания качественных цифрового двойника и цифровой тени мобильной канатной дороги.

При построении комплексной математической модели необходимо принимать во внимание следующие соображения.

1. Модель должна обеспечивать оценку параметров нагруженности при выполнении различных транспортно-технологических операций, на основе которых можно оценить силовые, прочностные, кинематические, динамические, энергетические и другие ключевые эксплуатационные свойства мобильной канатной дороги, ее надежность и экономичность.

2. При построении модели целесообразно использовать подходы и принципы системного анализа, выделив в ее структуре характерные подсистемы, которые обладают выраженным физическим единством и вследствие этого могут рассматриваться как самостоятельные структурные компоненты. Это дает возможность проведения в дальнейшем действий как по декомпозиции, так и по агрегированию указанных подсистем комплексной математической модели. Эти подсистемы взаимоувязаны между собой, так как конструкция мобильной канатной дороги и совокупность протекающих при ее эксплуатации рабочих процессов однозначно выражаются композицией конструкций, физико-механических свойств и локально протекающих при работе этих подсистем рабочих процессов с учетом взаимодействия и взаимовлияния подсистем.

Таким образом, базируясь на общих методологических принципах системного анализа и подходах, развитых в [16], комплексную математическую модель однопролетных одноканатных мобильных канатных дорог маятникового типа на базе сопряженных единой кольцевой несуще-тяговой канатной системой двух аэромобильных канатных установок целесообразно сформировать в виде пятикомпонентной системы «НТКС – ОСТО – система управления – опорное основание – окружающая среда» (здесь принято: НТКС – несуще-тяговая канатная система, ОСТО –

основное и сопутствующее технологическое оборудование).

Графическое представление данной комплексной математической модели приведено на рис. 3. Стрелками показаны взаимные связи ключевых структурных элементов подсистем как внутри самих этих подсистем, так и между подсистемами. Структурные элементы связаны между собой совместными параметрами, что позволяет учитывать при моделировании наличие как прямых, так и обратных связей между как между ними, так и между подсистемами.

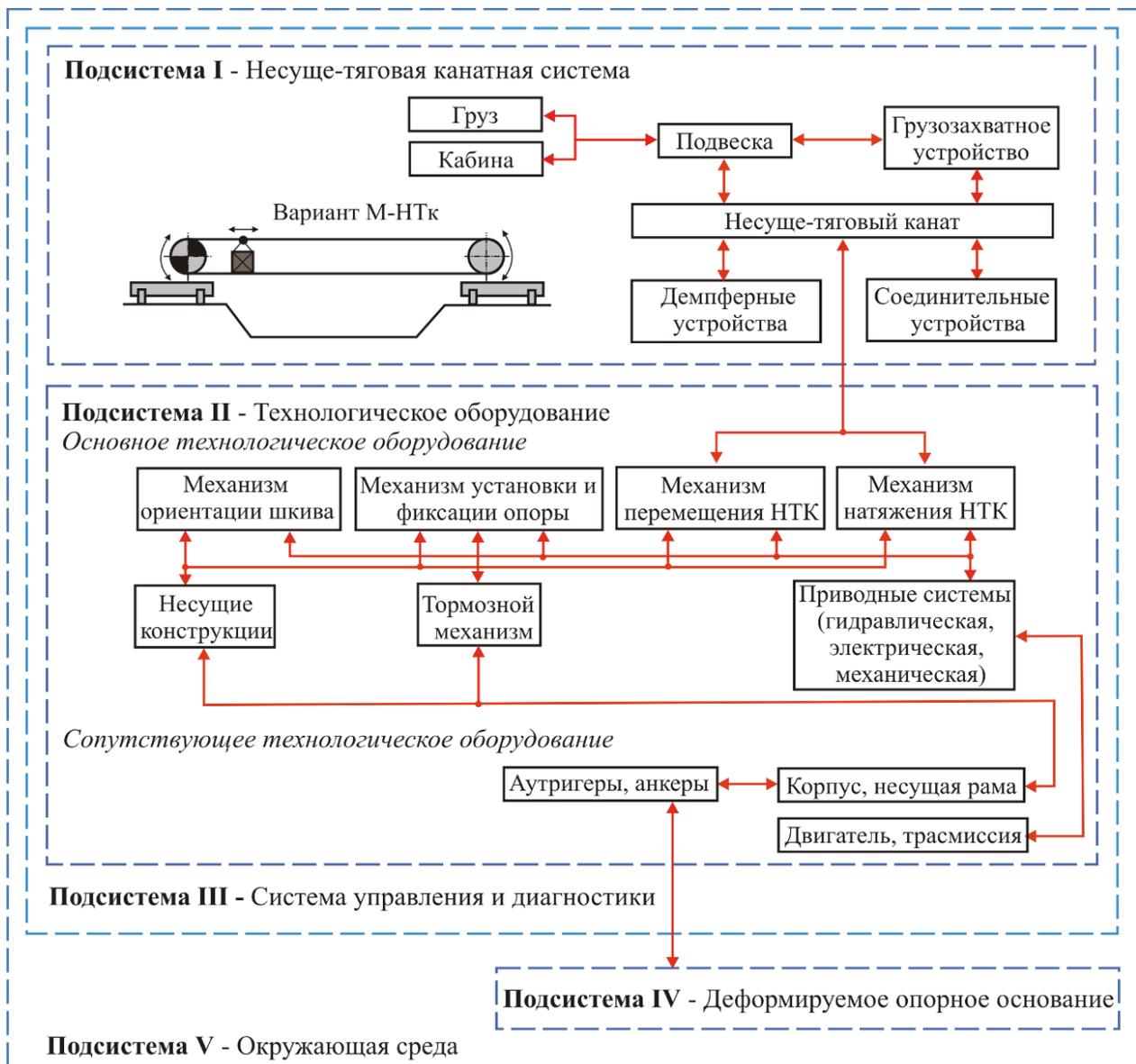


Рис. 3. Комплексная математическая модель мобильной канатной дороги на базе аэромобильных канатных установок как пятикомпонентной системы

4. Содержание комплексной модели

Использование комплексной математической модели (рис. 3), в состав которой включены локальные математические модели ключевых механизмов, устройств и систем основного и сопутствующего технологического оборудования, дающие возможность учесть различные варианты конструктивного исполнения и функционального назначения мобильной канатной дороги, позволяет обеспечить рациональную компоновку, проведение кинематического, силового, динамического и гидродинамического анализа технологического оборудования, оценку параметров нагруженности и надежности аэромобильных канатных установок, несущей канатной системы и мобильной канатной дороги в целом с целью создания конкурентоспособных конструкций, в том числе путем оптимального проектирования.

При проектировании основного и сопутствующего технологического оборудования аэромобильных канатных установок и моделировании протекающих при работе мобильных канатных дорог рабочих процессов для представления функционирования структурных элементов пятикомпонентной системы должны быть разработаны соответствующие локальные математические модели. Эти локальные математические модели, учитывающие взаимные связи структурных элементов путем использования согласованных входных/выходных данных, формируют внутреннюю структуру комплексной математической модели однопролетной одноканатной мобильной канатной дороги маятникового типа на базе аэромобильных канатных установок.

Базируясь на массиве ранее проведенных исследований мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексах [5, 13, 17], для каждой подсистемы комплексной математической модели (рис. 3) можно установить примерные перечень и содержание частных математических моделей, требующих своей дальнейшей разработки.

Подсистема I «Несущая канатная система» должна, в частности, включать такие математические модели, как:

- модель построения пространственной конфигурации ветвей несущей канатной однопролетной мобильной канатной дороги;
- тяговый расчет несущей канатной системы и модель построения диаграммы натяжения несущей канатной системы;
- модель оценки функциональных возможностей мобильных канатных дорог на базе аэромобильных канатных установок;
- модели оценки влияния основных параметров мобильных канатных дорог и аэромобильных канатных установок на грузопро пространственные характеристики канатных дорог;
- модель оценки массовой производительности мобильной канатной дороги;
- модель оценки оптимальных параметров грузовых канатных дорог с различной проектной производительностью;
- модель динамических процессов в несущей канатной системе;
- модели быстроразъемных соединений концов несущей канатной системы.

В качестве отправных научных исследований при разработке перечисленных математических моделей целесообразно использовать подходы, результаты и рекомендации, изложенные в таких работах, как [13, 18 - 21].

Подсистема II «Технологическое оборудование» должна, в частности, включать такие математические модели для основного и сопутствующего технологического оборудования, как:

- модели предварительной компоновки технологического оборудования на несущей раме аэромобильной канатной установки с учетом габаритных ограничений транспортного состояния;
- модели компоновки технологического оборудования на несущей раме с учетом требований рабочего состояния;
- модели силового расчета основного технологического оборудования на этапе установки концевой опоры в рабочее положение;
- модели силового расчета основного технологического оборудования на этапе эксплуатации аэромобильных канатных установок;

- модели нагруженности и расчета напряженно-деформированного состояния несущих конструкций аэромобильных канатных установок;

- модели прогнозирования общей устойчивости аэромобильных канатных установок против опрокидывания при эксплуатации мобильный канатных дорог и поперечной статической устойчивости аэромобильных канатных установок;

- модели динамических процессов в несущих конструкциях аэромобильных канатных установок;

- модели гидродинамических процессов в гидросистемах с частотно-дрессельным регулированием приводов исполнительных механизмов аэромобильных канатных установок;

- модели прогнозирования кинетики показателей надежности технологического оборудования при эксплуатации мобильной канатной дороги;

- модели формирование оптимальных стратегий технического обслуживания и планово-предупредительных ремонтов технологического оборудования аэромобильных канатных установок и несущее-тяговой канатной системы.

В качестве отправных научных исследований при разработке перечисленных математических моделей целесообразно использовать подходы, результаты и рекомендации, изложенные в таких работах, как [5, 17, 22 - 29].

Подсистема III «Система управления» должна предусматривать включение ряда математических моделей автоматизированного управления, диагностики текущих значений ключевых показателей функционального состояния и работы технологического оборудования, несущих конструкций аэромобильных канатных установок и несущее-тяговой канатной системы.

Подсистема IV «Деформируемое опорное основание» должна включать математическую модель оценки деформирования грунта в процессе эксплуатации мобильной канатной дороги.

В качестве отправных научных исследований при разработке перечисленных математических моделей целесообразно использовать подходы, результаты и рекомендации, изложенные в таких работах, как [30, 31].

Подсистема V «Окружающая среда» должна включать, в частности, такие математические модели, как:

- модель ветрового воздействия на транспортируемый груз, несущее-тяговую канатную систему и нагруженность несущих металлоконструкций аэромобильных канатных установок;

- модель температурного воздействия на несущее-тяговую канатную систему.

В качестве отправных научных исследований при разработке перечисленных математических моделей целесообразно использовать подходы, результаты и рекомендации, изложенные в таких работах, как [22, 32 - 36].

5. Заключение

Несмотря на наличие практических потребностей в использовании мобильного канатного оборудования, в настоящее время наблюдается дефицит подобных транспортно-перегрузочных канатных систем для наземного перемещения пассажиров или грузов.

Одной из причин такой ситуации является отсутствие обоснованных методов проектирования данного вида транспорта, с помощью которых можно создавать конкурентоспособное канатное оборудование. Поэтому представленный в статье методологический подход к построению комплексной математической модели однопролетной мобильной канатной дороги маятникового типа на базе аэромобильных канатных установок следует рассматривать как основу для дальнейших научных и прикладных исследований частных вопросов, касающихся проектирования и моделирования рабочих процессов при эксплуатации данного типа транспортно-технологического оборудования.

Список литературы

1. Степченко Т.А., Бабич О.В. Результаты научных исследований Брянского го-

+
+
+
+
+

References

1. Stepchenko T.A., Babich O.V. Results of scientific research of Bryansk State University

сударственного университета в сфере мобильных транспортно-перегрузочных канатных систем и комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 1. С. 9-29. DOI: 0.22281/2413-9920-2021-07-01-09-29

2. Hoffmann K., Zrnić N. A Contribution on the History of Ropeways // Explorations in the History of Machines and Mechanisms. History of Mechanism and Machine Science. Dordrecht: Springer, 2012. Vol. 15. P. 381–394.

3. Reichenbach M., Puhe M. Struggling with inertia: Regime barriers opposing planning and implementation of urban ropeways // J. of Urban Mobility. 2022. № 2. P. 100023.

4. Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Panfilova E.A., Lagerev I.A. Development of transport infrastructure of urban mobility based on cable metro technology // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 786. P. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012067

5. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Конструкции и основы проектирования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2020. 207 с.

6. Пат. 2780877 Рос. Федерация: МПК⁷ В61В 7/00. Быстромонтируемая мобильная канатная дорога / Лагерев А.В., Лагерев И.А. – №2022117303; заявл. 24.06.2022; опублик. 04.10.2022, Бюл. № 32.

7. Пат. 2818434 Рос. Федерация: МПК⁷ В61В 7/00. Модульная мобильная канатная дорога / Лагерев А.В. – № 2023131421; заявл. 28.11.2023; опублик. 02.05.2024, Бюл. № 13.

8. Таричко В.И., Лагерев И.А. Анализ альтернативных вариантов однопролетных мобильных канатных дорог на базе самоходных шасси // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2023. №1. С. 101-111. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-101-111

9. Шатунова Е.А., Лагерев И.А. Анализ технико-организационных возможностей вертолетов для развертывания мобильных канатных дорог на базе аэромобильных канатных установок // Научно-технический вестник Брянского государственного уни-

versiteta в сфере мобильных транспортно-перегрузочных канатных систем и комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2021, No.1, pp. 9-29. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-09-29. (In Russian)

2. Hoffmann K., Zrnić N. A Contribution on the History of Ropeways // Explorations in the History of Machines and Mechanisms. History of Mechanism and Machine Science. Dordrecht: Springer, 2012. Vol. 15. P. 381–394.

3. Reichenbach M., Puhe M. Struggling with inertia: Regime barriers opposing planning and implementation of urban ropeways. *Journal of Urban Mobility*, 2022, No. 2, pp. 100023.

4. Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Panfilova E.A., Lagerev I.A. Development of transport infrastructure of urban mobility based on cable metro technology. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 786, pp. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012067

5. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruktsii i osnovy proektirovaniya mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Structures and design fundamentals of mobile transporting and overloading rope facilities]. Bryansk, RISO BGU, 2020. 207 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10581288> (In Russian)

6. Patent RU 2780877, В61В 7/00. *Bystromontiruemaya mobilnaya kanatnaya doroga* [Fast-mounted mobile ropeway]. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Declared 24.06.2022. Published 04.10.2022. (In Russian)

7. Patent RU 2818434, В61В 7/00. *Modulnaya mobilnaya kanatnaya doroga* [Modular mobile ropeway]. Lagerev A.V. Declared 28.11.2023. Published 02.05.2024. (In Russian)

8. Tarichko V.I., Lagerev I.A. Alternative variants analysis of single-span mobile ropeways based on self-propelled chassis. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, No.1, pp. 101-111. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-101-111 (In Russian)

9. Shatunova E.A., Lagerev I.A. Analysis of the technical and organizational capabilities of helicopters for the deployment of mobile rope-

верситета. 2023. № 3. С. 255-268. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-255-268

10. Лагерев А.В. Обоснование и анализ принципа обеспечения универсальности габаритных размеров аэромобильных канатных установок в транспортном состоянии // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2023. №3. С. 239-254. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-239-254

11. ГОСТ Р 51876-2008. Контейнеры грузовые серии 1. Технические требования и методы испытаний. Часть 1. Контейнеры общего назначения. Введ. 2008-09-03. М.: Стандартиформ, 2011. 54 с.

12. ГОСТ Р 53350-2009. Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса. Введ. 2009-05-25. М.: Стандартиформ, 2018. 16 с.

13. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Надежность и безопасность эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2022. 207 с.

14. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Общий подход к созданию цифровых двойников мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №1. С. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60

15. Лагерев И.А., Таричко В.И., Панфилов А.В. Методика создания и применения цифрового двойника мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Advanced Engineering Research. 2020. Т. 20. № 3. С. 243-251.

16. Таричко В.И., Химич А.В. Комплексная математическая модель мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 523-532. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-523-532

17. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Моделирование рабочих процессов мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2021. 204 с. DOI: 10.5281/zenodo.6044972

ways based on airmobile rope units. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, No.3, pp. 255-268. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-255-268 (In Russian)

10. Lagerev A.V. Justification and analysis of the principle of ensuring the universality of the airmobile rope units overall dimensions in transport condition. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, No.3, pp. 239-254. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-239-254 (In Russian)

11. GOST R 51876-2008 *Series 1 freight containers - Specification and testing - Part 1: General cargo containers for general purposes*. Moscow, Standartinform, 2011. 54 p. (In Russian)

12. GOST R 53350-2009 *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings*. Moscow, Standartinform, 2018. 16 p. (In Russian)

13. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Nadezhnost i bezopasnost ekspluatatsii mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Reliability and safety of operation of mobile transport and overloading rope complexes]. Bryansk, RISO BGU, 2022. 207 p. (In Russian)

14. Lagerev A.V., Lagerev I.A. A general approach to the creation of digital twins of mobile ropeways based on mobile transport and reloading rope units. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.1, pp. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60 (In Russian)

15. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Panfilov A.V. Methods of creating and using a digital twin of a mobile transport and transshipment rope complex. *Advanced Engineering Research*, 2020, Vol.20, No.3, pp. 243-251. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-243-251. (In Russian)

16. Tarichko V.I., Khimich A.V. Comprehensive model of the mobile transport and overloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 523-532. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-523-532 (In Russian)

18. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Определение усилий натяжения канатов при эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 3. С. 194-210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210
19. Лагерев И.А., Лагерев А.В., Панфилов А.В., Марченко Э.В. Моделирование динамики пассажирской кабины транспортной системы «Канатное метро» // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18. № 1. С. 16-21. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-1-16-21
20. Таричко В.И. Конструкция и анализ технических характеристик быстроразъемного устройства для соединения концов канатов мобильных канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №2. С. 131-141.
21. Wang L., Rega G. Modelling and transient planar dynamics of suspended cables with moving mass // *International Journal of Solids and Structures*. 2010. Vol. 47. P. 2733–2744. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2010.06.002
22. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В., Таричко В.И. Транспортно-логистические технологии и машины для цифровой урбанизированной среды. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. 268 с. DOI: 10.5281/zenodo.3551132.
23. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Моделирование режимов работы гидрориводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480.
24. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Вероятностно-временной анализ кинетики показателей надежности на стадии проектирования канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вест-
17. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Modelirovanie rabochikh protsessov mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Modeling of working processes of mobile transporting and overloading rope facilities]. Bryansk, RISO BGU, 2021. 204 p. DOI: 10.5281/zenodo.6044972. (In Russian)
18. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Determination of tension forces of ropes during the operation of mobile transport and reloading rope complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.3, pp. 194-210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210 (In Russian)
19. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Panfilov A.V., Marchenko E.V. Cabin dynamics simulation of “Rope Metro” transport system. *Vestnik of DSTU*, 2018, Vol. 18, No.1, pp. 16-21. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-1-16-21> (In Russian)
20. Tarichko V.I. Design and analysis of technical characteristics of a quick-release device for connecting the ropes ends for mobile ropeways. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 131-141. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-131-141. (In Russian)
21. Wang L., Rega G. Modelling and transient planar dynamics of suspended cables with moving mass. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, Vol. 47, pp. 2733–2744. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2010.06.002
22. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V., Tarichko V.I. *Transportno-logisticheskie tekhnologii i mashiny dlya tsifrovoy urbanizirovannoy sredy* [Transport and logistics technologies and machines for the digital urban environment]. Rostov-on-Don, Don State Technical University, 2019. 268 p. DOI: 10.5281/zenodo.3551132 (In Russian)
23. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Modeling operation modes of hydraulic drives with frequency-throttle regulation of mobile transport and overloading ropes complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-

ник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 256-275. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275

25. Лагереv И.А., Лагереv А.В., Таричко В.И. Варианты компоновки основного технологического оборудования на базовых шасси мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов и их сравнительный анализ // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №3. С. 236-250. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-03-236-250

26. Лагереv И.А., Таричко В.И., Лагереv А.В. Компоновка технологического оборудования на базовом шасси мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №3. С. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403

27. Лагереv И.А., Таричко В.И., Лагереv А.В. Формирование стратегии восстановления канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса в процессе эксплуатации // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293

28. Таричко В.И. Структурная оптимизация гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса на основе Парето-оптимальных решений // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №4. С. 506-517. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-506-517

29. Таричко В.И., Шалупина П.И. Моделирование нагруженности рамы базовой станции мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №2. С. 166-175. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-02-166-175

30. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Tarichko V.I. Modeling the swing of mobile loader cranes with anchor outriggers when operating on weak soils // E3S Web of Conferences.

04-462-480 (In Russian)

24. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Probability-temporal analysis of reliability indicators kinetics at the stage of designing a rope system of a mobile transport and reloading ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 256-275. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275 (In Russian)

25. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Tarichko V.I. Variants of the layout of the main technological equipment on the base chassis of mobile transport and reloading rope complexes and their comparative analysis. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.3, pp. 236-250. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-03-236-250 (In Russian)

26. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Placement of technological equipment on the basic chassis of the mobile transportation and reloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.3, pp. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403 (In Russian)

27. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Lagerev A.V. Formation of the strategy for restoring the rope system of the mobile transport and reloading rope complex during operation. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293 (In Russian)

28. Tarichko V.I. Structural optimization of the hydraulic drive of a mobile transport and reloading rope complex based on Pareto-optimal solutions. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.4, pp. 506-517. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-506-517. (In Russian)

29. Tarichko V.I., Shalupina P.I. Load simulation of a base station chassis of the mobile transport and overloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.2, pp. 166-175. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-02-166-175. (In Russian)

30. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Tarichko V.I.

2021. № 326. P. 00011.

31. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Моделирование рабочих процессов и проектирование элементов гидропривода. Брянск: РИСО БГУ, 2019. 201 с.

DOI: 10.5281/zenodo.3268490

32. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2017. 344 с. DOI: 10.5281/zenodo.1311913.

33. Guštinčić J., Raffi L.M.G. Analysis of oscillations in a cableway: wind load effects // *Modeling in Science Education and Learning*. 2013. № 6. P. 145-155.

34. Hoffmann K. Oscillation Effects of Ropeways Caused by Cross-Wind and Other Influences // *FME Transactions*. 2009. №37. P. 175-184.

35. Knawa-Hawryszków M., Prokopowicz D., Bryja D. Multipurpose nonlinear cable model for dynamic response of structures under moving load // *Computers and Structures*. 2021. №257. P. 106642.

36. Lepidi M., Gattulli V. Static and dynamic response of elastic suspended cables with thermal effects // *International Journal of Solids and Structures*. 2012. Vol. 49. P. 1103–1116. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2012.01.008

Modeling the swing of mobile loader cranes with anchor outriggers when operating on weak soils. In: Maksarov V.V., Gabov V.V. and Martyushev N.V. *Proceedings of the International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering (IPDME 2021), 22-23 April 2021, St Petersburg, Russian Federation*. E3S Web of Conferences, 2021, Vol. 326, pp. 00011 DOI: 10.1051/e3sconf/202132600011

31. Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Sovremennaya teoriya manipulatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselevykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov. Issledovanie rabochikh protsessov i proektirovanie elementov gidroprivoda* [Modern theory of manipulation systems of mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes. Research of working processes and design of hydraulic drive elements]. Bryansk, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, 2019. 201 p. DOI: 10.5281/zenodo.3268490 (In Russian)

32. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. DOI: 10.5281/zenodo.1311913 (In Russian)

33. Guštinčić J., Raffi L.M.G. Analysis of oscillations in a cableway: wind load effects. *Modeling in Science Education and Learning*, 2013, No. 6, pp. 145-155.

34. Hoffmann K. Oscillation Effects of Ropeways Caused by Cross-Wind and Other Influences. *FME Transactions*, 2009, Vol. 37, pp. 175-184.

35. Knawa-Hawryszków M., Prokopowicz D., Bryja D. Multipurpose nonlinear cable model for dynamic response of structures under moving load. *Computers and Structures*, 2021, Vol. 257, pp. 106642.

36. Lepidi M., Gattulli V. Static and dynamic response of elastic suspended cables with thermal effects. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, Vol. 49, pp. 1103–1116. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2012.01.008