

УДК (UDC) 625.1/.5

**ОБЩИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ МОБИЛЬНЫХ
КАНАТНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-
ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ КАНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ****A GENERAL APPROACH TO THE CREATION OF DIGITAL TWINS OF MOBILE
ROPEWAYS BASED ON MOBILE TRANSPORT AND RELOADING ROPE UNITS**Лагереv А.В., Лагереv И.А.
Lagerev A.V., Lagerev I.A.Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассмотрен концептуальный подход и практические аспекты создания цифровых двойников мобильных канатных дорог, формируемых двумя концевыми мобильными транспортно-перегрузочными канатными комплексами на базе самоходных многоосных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости. Подход основан на системном представлении и анализе конструктивного исполнения и режимов эксплуатации мобильной канатной дороги. Как следствие, цифровой двойник формируется как многоуровневая иерархическая структура. Она объединяет информационные математические модели различного функционального назначения и различной степени взаимной связности, которые распределены по уровням в зависимости от степени сложности и возможности их дальнейшего агрегирования в информационные математические модели более высокого уровня. Применительно к типичной мобильной канатной дороге проведен структурно-функциональный анализ, на основе которого установлены ее базовые компоненты, а также определены расчетные структурные элементы (технические устройства и системы), требующие разработки необходимых индивидуальных информационных математических моделей. Рассмотрены подходы к агрегированию нескольких индивидуальных моделей расчетных элементов, связанных общими характерными количественными параметрами моделирования, в групповые информационные математические модели, а затем – в режимные и полные информационные математические модели структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги. Рассмотренный в статье системный подход и разработанная на его основе многоуровневая иерархическая структура цифрового двойника полезны и эффективны с точки зрения обеспечения модульности создания цифрового двойника, его модификации для мобильных канатных дорог иного конструктивного исполнения, возможности использования ранее разработанных информационных математических моделей для аналогичных расчетных структурных элементов.

Abstract. The article considers the conceptual approach and practical aspects of creating digital twins of mobile ropeways formed by two end mobile transport and reloading rope units based on self-propelled multi-axle wheeled chassis of high load capacity and cross-country ability. The approach is based on a systematic representation and analysis of the design and operating modes of a mobile ropeway. As a consequence, the digital twin is formed as a multilevel hierarchical structure. It combines information mathematical models of various functional purposes and varying degrees of mutual connectivity, which are distributed by levels depending on the degree of complexity and the possibility of their further aggregation into information mathematical models of a higher level. In relation to a typical mobile ropeway, a structural and functional analysis was carried out, on the basis of which its basic components were established, and calculated structural elements (technical devices and systems) were determined, requiring the development of the necessary individual information mathematical models. Approaches to aggregation of several individual models of computational elements connected by common characteristic quantitative parameters of modeling into group information mathematical models, and then into mode and complete information mathematical models of structural and functional components of a mobile ropeway are considered. The system approach considered in the article and the multilevel hierarchical structure of the digital twin developed on its basis are useful and effective from the point of view of ensuring the modularity of creating a digital twin, its modification for mobile ropeways of a different design, the possibility of using previously developed information mathematical models for similar computational structural elements.

Ключевые слова: мобильная канатная дорога, цифровой двойник, системный анализ, информационная математическая модель, проектирование.

Дата принятия к публикации: 10.02.2022
Дата публикации: 25.03.2022

Сведения об авторах:

Лагерев Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: 0000-0003-0380-5456

Лагерев Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-0921-6831

Keywords: mobile ropeway, digital twin, systems analysis, information mathematical model, design.

Date of acceptance for publication: 10.02.2022
Date of publication: 25.03.2022

Authors' information:

Alexander V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice director of Research Institute of Fundamental and Applied Research, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: 0000-0003-0380-5456

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice rector for Innovations, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-0921-6831

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00798)

Acknowledgements

The study was supported by the grant of Russian science Foundation (project No. 22-29-00798)

1. Введение

Канатные транспортно-логистические системы в виде стационарных подвесных или буксировочных канатных дорог нашли достаточно широкое применение для организации перевозки грузов и пассажиров в горной, лесистой, труднодоступной или экологически уязвимой местности [1, 2]. Они достаточно активно используются в странах Европы, включая Россию, Латинской Америки, Азии. В настоящее время этот вид транспорта рассматривается как перспективный для использования при организации пассажирских и грузовых перевозок также в условиях сильно урбанизированной среды – в пределах крупных городов и городских агломераций [3, 4].

Параллельно с развитием новых конструкций традиционных стационарных подвесных канатных дорог в России и за рубежом ведутся научные и прикладные исследования по созданию канатных транспортных систем нового поколения. Эволюция канатных дорог идет двумя путями:

- путем создания пассажирских городских канатных систем, в частности, систем типа «Канатное метро» [5] на основе исполь-

зования современных мехатронных и многоканатных автоматизировано управляемых систем;

- путем создания мобильных канатных дорог на основе самоходных колесных или гусеничных шасси или прицепов высокой грузоподъемности и проходимости, в частности, трелевочных канатных установок [6] или мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов [7].

Мобильные канатные комплексы имеют многоцелевое назначение. Они могут быть эффективным средством для выполнения транспортно-логистических операций при строительстве объектов (доставка материалов, технологического оборудования, людей и т.п.), разового проведения транспортно-перегрузочных мероприятий при минимальном времени монтажа/демонтажа транспортной системы или проведении горно-добывающих и лесохозяйственных работ на заранее не обустроенных территориях со сложным рельефом (горная или сильно пересеченная местность и т.д.) [7]. Однако они также могут использоваться при проведении аварийно-спасательных операций в зонах чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера, в зонах военных или антитеррори-

стических операций для оперативной переброски необходимых сил и средств, для освоения Арктики, включая транспортное обслуживание судов снабжения [8].

Для создания современных конкурентоспособных конструкций машин и оборудования отечественного производства для мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, обладающих высокими техническими, экономическими и экологическими характеристиками, требуется создание как научно обоснованной теории исследования рабочих процессов данного вида транспорта, так и разработка новых компьютеризированных методов проектирования, экспериментальной отработки опытных образцов и мониторинга в процессе дальнейшей эксплуатации.

В рамках осуществляющегося в настоящее время во всех отраслях промышленности перехода к технологиям Индустрии 4.0 при решении указанных технических задач целесообразно использовать такой перспективный подход к совершенствованию проектирования сложных технических систем, как цифровых двойников объектов или процессов [9, 10].

Мобильные канатные дороги являются идеальным объектом для создания таких

цифровых двойников [11]. Развивая исследование, начатое в [11], в данной статье рассмотрен концептуальный подход и практические аспекты создания цифровых двойников мобильных канатных дорог, формируемых двумя концевыми мобильными транспортно-перегрузочными канатными комплексами на базе самоходных многоосных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости.

2. Структурно-функциональный анализ мобильной канатной дороги

2.1. Общая структурная схема мобильной канатной дороги

Схема мобильной канатной дороги, формируемой двумя сопряженными посредством канатной системы мобильными транспортно-перегрузочными канатными комплексами на базе самоходных колесных или гусеничных специальных шасси или тяжелых буксируемых прицепов повышенной грузоподъемности и проходимости, которая обеспечивает необходимые транспортно-логистические грузовые и пассажирские операции, показана на рис. 1 [7].

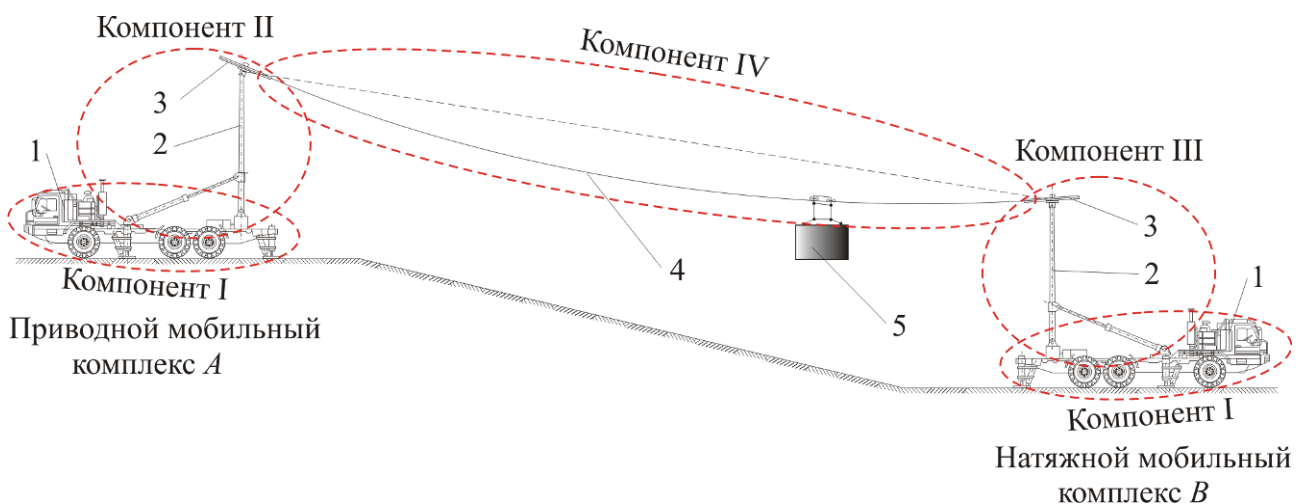


Рис. 1. Схема мобильной канатной дороги на основе двух концевых мобильных комплексов: 1 – концевая опора; 2 – канатный шкив; 3 – несущий канат; 4 – транспортируемый груз на подвеске

В общем случае мобильная канатная дорога состоит из двух сопряженных концевых мобильных комплексов (базовых станций) А

и В, установленных в конечных точках трассы. На оголовках концевых опор 1 установлены канатные шкивы 2 с тяговым и натяж-

ным механизмами. В процессе эксплуатации работает лишь один из этих механизмов, а другой отключен. Как следствие, один из концевых мобильных комплексов обеспечивает перемещение несущего-тягового каната с закрепленным на нем с помощью подвески транспортируемым грузом 4, а второй – необходимое натяжение несущего-тягового каната.

Таким образом, рассмотренный вариант конструктивного исполнения мобильной канатной дороги в процессе ее эксплуатации состоит из следующих структурно-функциональных компонентов:

- самоходного шасси мобильного комплекса (компонент I на рис. 1);
- основного технологического оборудования приводного мобильного комплекса (компонент II на рис. 1);
- основного технологического оборудования натяжного мобильного комплекса (компонент III на рис. 1);
- канатной системы (компонент IV на рис. 1).

В состав комплекта мобильной канатной дороги также входит дополнительное технологическое оборудование, в частности, устройства торможения, демпфирования продольных и поперечных колебаний подвижного состава, контроля положения тягового и несущего канатов и др.

Представленная на рис. 1 мобильная канатная дорога маятникового типа с одиночным несущим-тяговым канатом является наиболее простой по конструктивному исполнению и номенклатуре используемых узлов и механизмов. Однако возможны другие альтернативные варианты конструктивного исполнения мобильных канатных дорог на основе двух концевых мобильных комплексов, каждый из которых обладает как определенными технико-экономическими преимуществами, так и недостатками. Указанные варианты отличаются особенностями компоновки основного технологического оборудования (в первую очередь, особенностями размещения и фиксации в рабочем положении концевых опор) и особенностями конструкции их канатной системы, состоящей из совокупности несущих, тяговых или несущих-тяговых канатов [7].

Тем не менее, для всех известных конструктивных разновидностей мобильных дорог на основе двух концевых мобильных комплексов рассмотренные далее принципы, лежащие в основе общий подход к созданию цифровых двойников, остаются неизменными.

2.2. Расчетные структурные элементы мобильной канатной дороги

Совокупность структурных элементов мобильной канатной дороги в целом складывается из совокупности структурных элементов каждого из четырех выявленных структурно-функциональных компонентов (рис. 1). При этом, исходя из принципа унификации промышленной продукции, компоненты II и III следует считать конструктивно, структурно и функционально идентичными, т.е. любой из этих компонентов в процессе эксплуатации мобильной канатной дороги может выполнять как функции приводного мобильного комплекса, так и функции натяжного мобильного комплекса.

Детализация конструкции структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги позволяет выявить значительное число конструктивных элементов – устройств и систем, которые так или иначе оказываются необходимыми для экономической, надежной и безопасной эксплуатации дороги. Исчерпывающий список этих элементов определяется содержанием спецификаций на изделия машиностроения и приборостроения, разработанных на стадии проектирования компонентов мобильной канатной дороги. Очевидно, не все конструктивные элементы целесообразно принимать во внимание при создании цифровых двойников. Однако обязателен учет тех элементов, которые вносят вклад в формирование рабочих процессов различной физической природы, протекающих при эксплуатации мобильной канатной дороги в целом и ее отдельных компонентов. В числе подлежащих учету первостепенных рабочих процессов можно отметить такие, как формирование нестационарного напряженно-деформированного и вибронпряженного состояний, повреждаемости и деградации несущих конструкций, динами-

ка и колебания конструкций, узлов и канатов, гидро- или пневмодинамические процессы в гидро- или пневмоприводах механизмов движения и др. Такие конструктивные элементы должны рассматриваться как расчетные структурные элементы и их учет в той или иной степени должен быть выполнен при создании цифрового двойника.

Процедура выявления всех расчетных структурных элементов, учет которых обеспечивает качество результатов использования цифрового двойника, основывается на четком представлении, в первую очередь, особенностей конструкции и функционирования при выполнении всех основных рабочих и вспомогательных технологических операций структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги. С этой целью необходимо провести структурно-функциональный анализ перспективных вариантов конструктивного исполнения мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Такие перспективные варианты мобильных комплексов на базе самоходных колесных многоосных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, защищенные патентами РФ, достаточно подробно рассмотрены в [7, 12].

В качестве конкретного примера, иллюстрирующего процедуру выявления расчетных структурных элементов мобильной канатной дороги, рассмотрим вариант конструктивного исполнения мобильного комплекса с центральным расположением концевой опоры и ее фиксацией в рабочем положении с помощью приводного силового гидроцилиндра [13], защищенного патентом РФ № 200827 [14]. Общий вид мобильного комплекса показан на рис. 2 и 3 [7, 13].

На надрамной конструкции 1, установленной на несущей раме 2 самоходного колесного шасси, своим нижним концом закреплена концевая опора 4. Узел ее крепления представляет собой цилиндрический шарнир, что концевой опоре поворотное движение в вертикальной плоскости, совпадающей с продольной осью мобильного шасси, на угол α не более 120° . К нижней части концевой опоры с помощью цилиндрического шарнира крепится шток 8 подъ-

емного гидроцилиндра 9. Корпус подъемного гидроцилиндра с помощью цилиндрического шарнира крепится к надрамной конструкции. Возможно использование как одиночного подъемного гидроцилиндра, так и сдвоенных параллельно установленных и синхронно работающих гидроцилиндров одинакового типоразмера (рис. 3). К оголовку концевой опоры крепится механизм поворота канатного шкива (элемент I на рис. 2, б). Конструктивные элементы механизма поворота закреплены на раме 14. На этой же раме закреплен гидромотор механизма перемещения несущего каната, к которому подается рабочая жидкость от гидравлического насоса гидросистемы мобильного комплекса. Выходной вал гидромотора посредством трансмиссии, включающей червячный редуктор 23, кинематически связан с приводным валом 25, на конце которого закреплен канатный шкив 26. В профилированном ручье канатного шкива располагается несущий канат 27.

К месту назначения мобильный комплекс выдвигается, имея концевую опору в транспортном положении (рис. 2, а). При достижении места назначения мобильный комплекс ориентируется так, чтобы продольная ось мобильного шасси совпадала с продольной осью канатной дороги. Использование промежуточных опор не предусматривается, то есть формируется однопролетная грузовая канатная дорога маятникового типа. Для обеспечения общей устойчивости в условиях действия значительных горизонтальных опрокидывающих нагрузок от силы натяжения несущего каната и транспортируемого груза самоходная концевая станция выставляется на аутригеры (выносные опоры), которые закрепляются в грунте с помощью дополнительных анкерных устройств. В их качестве могут быть использованы известные конструкции аутригеров с анкерными устройствами [15]). Установка концевой опоры производится в два этапа в связи с необходимостью согласования взаимного расположения канатных шкивов сопрягаемых мобильных комплексов при их объединении в единую канатную транспортную систему с помощью общего несущего каната.

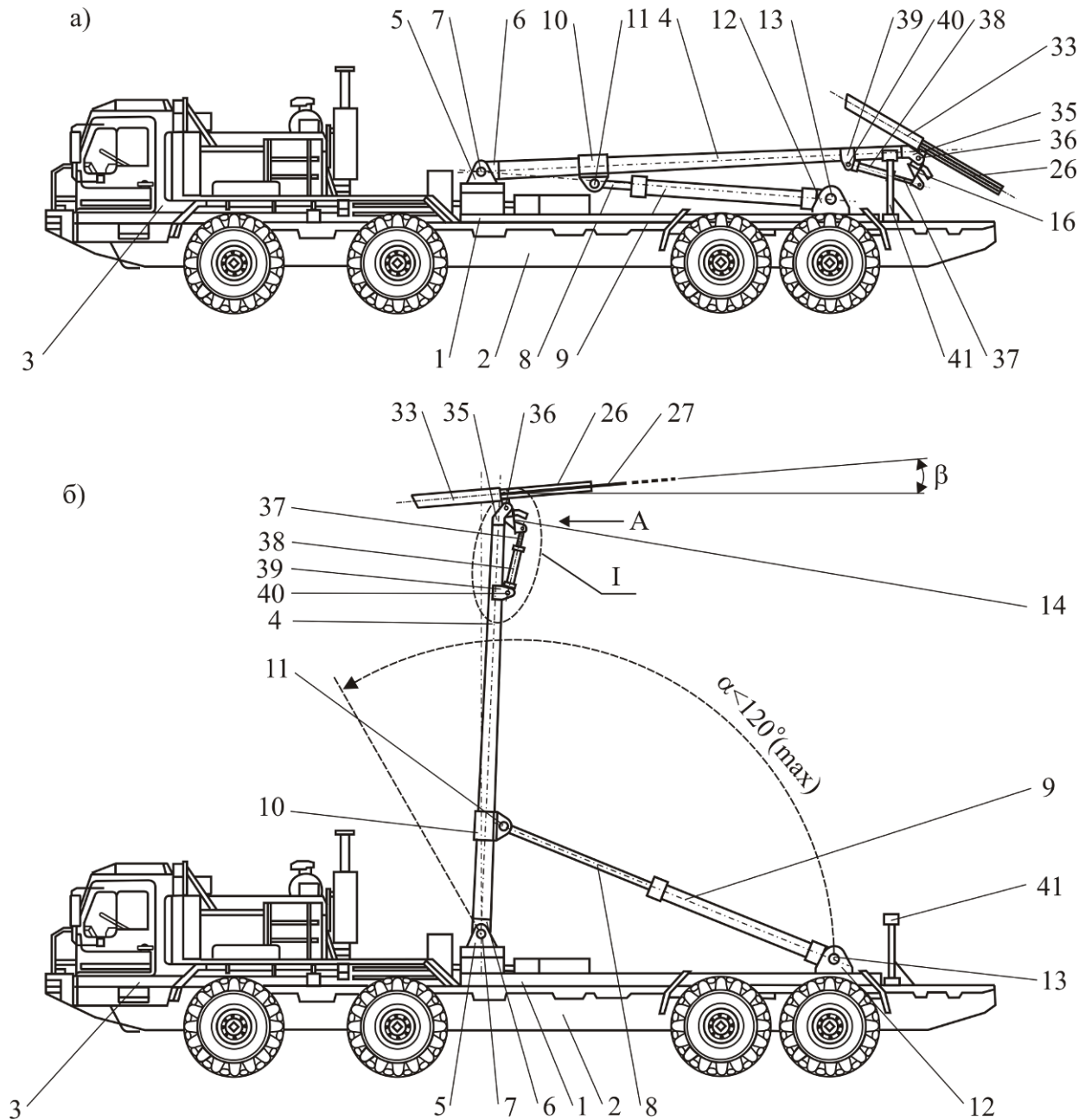


Рис. 2. Общий вид мобильного комплекса (вид сбоку) [7, 13]: а – транспортное положение концевой опоры; б – рабочее положение концевой опоры

(1 - надрамная конструкция; 2 - несущая рама; 3 - самоходное колесное шасси (самоходная концевая станция мобильной канатной дороги); 4 - концевая опора; 5, 6 – проушина; 7, 11, 13, 36, 40 - шарнирный палец; 8, 37 – шток; 9 - подъемный гидроцилиндр; 10, 12, 18, 35, 39 - профилированная проушина; 14 – рама; 15 - горизонтальная пластина; 16 - вертикальная пластина; 17 - ребро жесткости; 19, 31 - болт; 20 – гидромотор; 21 - штуцер; 22, 24 – муфта; 23 - червячный редуктор; 25 - приводной вал; 26 - канатный шкив; 27 - несуще-тяговый канат; 28 - упорный роликоподшипник; 29 - сферический радиальный шарикоподшипник; 30 – стакан; 32 - торцевая крышка; 33 - предохранительный кожух; 34 – полуось; 38 - поворотный гидроцилиндр; 41 - транспортная стойка; 42 – крепежная втулка; элемент I – механизм поворота канатного шкива)

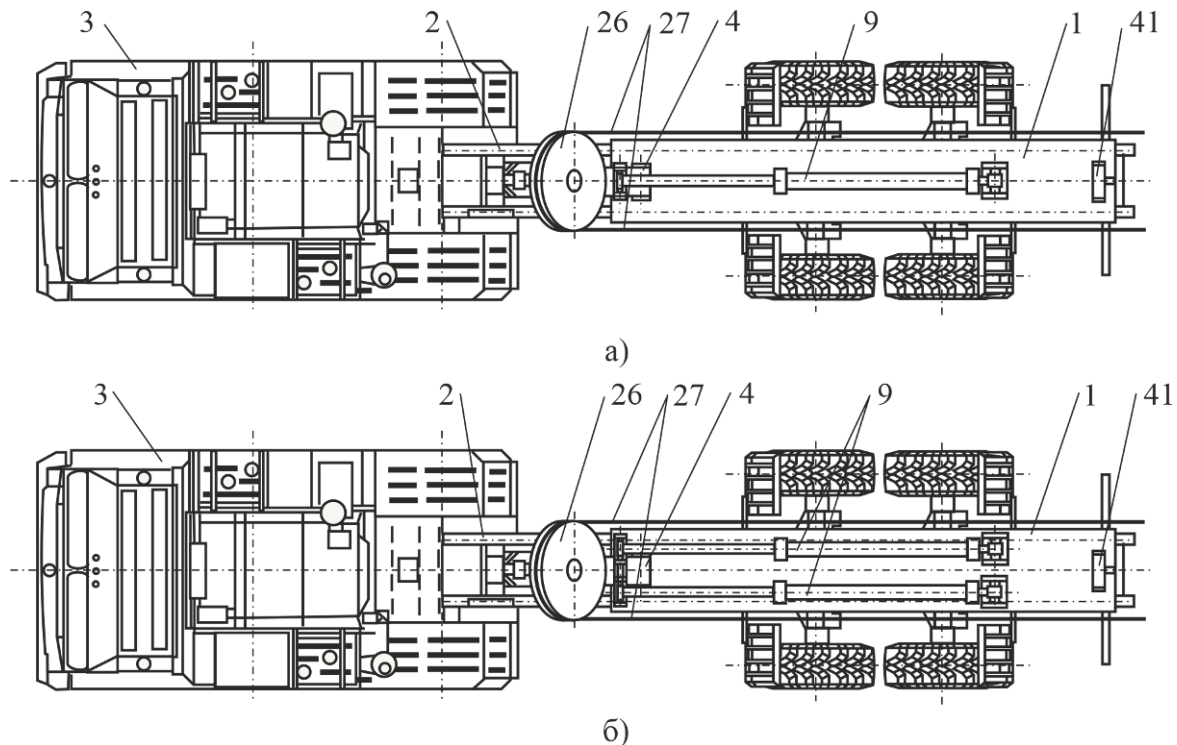


Рис. 3. Общий вид мобильного комплекса (вид сверху) [13]: а – с одинарным подъемным гидроцилиндром; б – со сдвоенными подъемными гидроцилиндрами

На первом этапе установки, который носит предварительный характер, закольцованный несущее-тяговый канат размещается в ручье канатного шкива. При этом предохранительный кожух обеспечивает надежную фиксацию несущее-тягового каната, исключая возможность его соскакивания с канатного шкива в процессе дальнейшего перемещения концевой опоры из транспортного в рабочее положение. Путем выдвигания штока подъемного гидроцилиндра, в который по напорным трубопроводам подается под давлением рабочая жидкость из гидросистемы мобильного комплекса, концевая опора предварительно поворачивается на приблизительно требуемый угол α . Величина этого угла определяется, исходя из взаимного высотного расположения на местности мобильных комплексов. Если соседний мобильный комплекс расположен выше, то, как правило, угол α должен быть не менее 90° , в противном случае угол α должен быть не более 90° . Далее путем выдвигания штока поворотного гидроцилиндра рама механизма поворота канатного шкива, а вместе с ней и сам канатный шкив предварительно поворачиваются относительно продольной оси концевой опо-

ры на приблизительно требуемый угол, не превышающий 90° . Этот угол определяется, исходя из необходимости соответствия угла наклона к горизонту плоскости канатного шкива и угла наклона к горизонту продольной оси несущее-тягового каната при установке обоих мобильных комплексов в рабочее положение. На втором этапе установки концевой опоры, который носит регулировочный характер, путем дополнительного (корректирующего) выдвигания штока подъемного гидроцилиндра концевая опора поворачивается в пределах нескольких градусов, что приводит к получению окончательного значения требуемого угла α . Дополнительный поворот канатного шкива обеспечивает точное согласование расположения продольной оси несущее-тягового каната плоскости канатного шкива, что исключает повышенный износ профилированного ручья шкива и самого каната, повышает ресурс работы элементов канатной системы мобильной канатной дороги и безопасность ее эксплуатации. Механизм движения несущее-тягового каната приводного мобильного комплекса обеспечивает маятниковое перемещение транспортируемых грузов вдоль

трассы канатной дороги. Механизм натяжения несущего-тягового каната приводного мобильного комплекса обеспечивает его оптимальное натяжение в соответствии с известными рекомендациями [16].

В качестве структурно-функционального компонента I мобильной канатной дороги (т.е. самоходного шасси мобильного комплекса) целесообразно рассматривать возможность использования уже известные и выпускаемые отечественной или зарубежной автомобильной промышленностью самоходные шасси. Колесные машины высокой проходимости и грузоподъемности гражданского, военного и многоцелевого назначения проектируются и выпускаются крупными машиностроительными предприятиями ряда

промышленно развитых стран, включая Россию (ПАО «КАМАЗ», АО «Брянский автомобильный завод», АО «Уральский автомобильный завод», АО «Заволжский завод гусеничных тягачей»), Беларусь (ОАО «Минский автомобильный завод», ОАО «Минский завод колесных тягачей»), Германию (MAN SE, Daymler AG), Италию (Iveco), Китай (Dongfeng, FAW), Нидерланды (DAF), США (FreightLiner, Caterpillar), Францию (Renault), Чехию (Tatra), Швецию (Volvo AB, Scania AB), Японию (Mitsubishi) [15, 17]. На рис. 4 показан характерный общий вид многоосного колесного шасси, пригодного для размещения основного технологического оборудования (компонентов II и III мобильной канатной дороги).

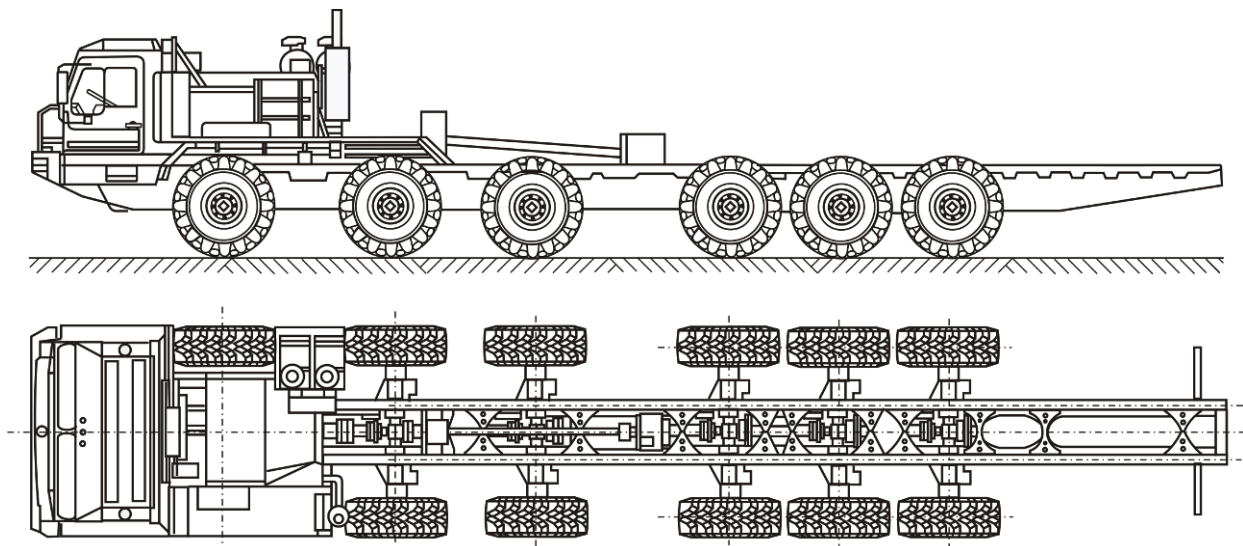


Рис. 4. Общий вид 6-осного колесного шасси высокой грузоподъемности и проходимости

При разработке той части цифрового двойника мобильной канатной дороги, которая касается компонента I, наиболее эффективным является использование ранее разработанного цифрового двойника самоходного колесного шасси (если такая возможность имеется), интегрировав его в общую структуру цифрового двойника мобильной канатной дороги. При отсутствии возможности использования известного цифрового двойника компонента I его необходимо создавать с учетом конструкции и состава механизмов и систем выбранного самоходного шасси. В этом случае целесообразно ориентироваться на имеющуюся проектно-конструкторскую документацию и научно-техническую литературу,

например, на работы [18–26]. Укрупнено в качестве расчетных элементов компонента I мобильной канатной дороги должны выступать такие, как:

- силовая установка (\mathcal{E}_{cy});
- несущая рама (\mathcal{E}_{np});
- трансмиссия (\mathcal{E}_{tm});
- устройство отбора мощности для работы основного технологического оборудования мобильной канатной дороги (\mathcal{E}_{om});
- ходовая часть (\mathcal{E}_{xc});
- рулевое управление (\mathcal{E}_{py});
- тормозная система (\mathcal{E}_{tc});
- кабина водителя (\mathcal{E}_{kb});
- электрооборудование ($\mathcal{E}_{эо}$);
- система кондиционирования ($\mathcal{E}_{ск}$);

- выносные опоры ($\mathcal{E}_{\text{во}}$).

Учитывая целесообразность производственной унификации компонентов II и III мобильной канатной дороги (т.е. основного технологического оборудования приводного и натяжного мобильных комплексов) и известные перспективные конструкции основного технологического оборудования мобильных канатных дорог [7, 12, 13, 27, 28], в качестве расчетных элементов структурно-функциональных компонентов II и III должны выступать такие элементы, как:

- концевая опора ($\mathcal{E}_{\text{ко}}$);

- насосная система ($\mathcal{E}_{\text{нс}}$), обеспечивающая работу всех гидравлических приводов и устройств мобильного комплекса;

- механизм установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении ($\mathcal{E}_{\text{уф}}$), обеспечивающий подъем опоры из транспортно-го положения в рабочее положение для обеспечения требуемого высотного расположения канатной системы;

- механизм перемещения несущего тягового каната (приводной механизм) ($\mathcal{E}_{\text{пк}}$), обеспечивающий маятниковое движение транспортируемых грузов;

- механизм пространственной ориентации канатного шкива ($\mathcal{E}_{\text{по}}$), обеспечивающий взаимную параллельность продольных осей ручья канатного шкива и каната с учетом естественного провисания каната под нагрузкой во время эксплуатации;

- механизм натяжения несущего тягового каната ($\mathcal{E}_{\text{нк}}$), обеспечивающий оптимальное натяжение каната во время эксплуатации мобильной канатной дороги;

- система управления ($\mathcal{E}_{\text{уп}}$), обеспечивающая работу и мониторинг всех узлов, устройств и приборов основного технологического оборудования;

- тормозной механизм ($\mathcal{E}_{\text{тм}}$), исключающий самопрокидывание концевой опоры при ее переводе из транспортного в рабочее положение;

- дополнительные устройства, механизмы и системы ($\mathcal{E}_{\text{ду}}$), необходимые с учетом специфических конструктивных особенностей основного технологического оборудования (например, механизм канатной или канатно-гидравлической фиксации концевой опоры,

шарнирно-сочлененная штанга механизма подъема и фиксации концевой опоры, механизм предварительного подъема концевой опоры, устройство расчаливания концевой опоры и др. [7]).

Анализ существующих вариантов конструктивного исполнения канатных систем стационарных и мобильных грузовых и пассажирских канатных дорог, в частности, представленных в [7, 29-32], в качестве расчетных элементов структурно-функционального компонента IV мобильной канатной дороги (т.е. канатной системы) должны выступать такие элементы, как:

- несущий, тяговый или несущего-тяговый канат ($\mathcal{E}_{\text{кт}}$);

- устройство для подвешивания транспортируемого груза ($\mathcal{E}_{\text{пг}}$);

- контрольно-диагностическая система мониторинга канатной системы ($\mathcal{E}_{\text{см}}$), обеспечивающая постоянный контроль величин ее кинематических и силовых параметров;

- система безопасности движения транспортируемого груза ($\mathcal{E}_{\text{сб}}$), обеспечивающая предотвращения возможных аварийных ситуаций вследствие вертикальных колебаний и ветрового раскачивания груза, дефектного крепления груза, отклонения режима торможения груза в точке останова, повреждения несущего каната и др.

При создании цифрового двойника мобильной канатной дороги в число расчетных элементов необходимо также дополнительно включить такие вспомогательные элементы, как:

- транспортируемый груз ($\mathcal{E}_{\text{тг}}$);

- опорная поверхность ($\mathcal{E}_{\text{оп}}$), обеспечивающая размещение и анкеровку мобильного комплекса;

- окружающая среда ($\mathcal{E}_{\text{ос}}$);

- особые процессы природного или техногенного характера ($\mathcal{E}_{\text{ап}}$), возникновение которых при эксплуатации мобильной канатной дороги приводит к нештатной или аварийной работе компонентов.

Эти расчетные элементы обеспечивают оценку необходимых исходных данных (в дополнение к исходным данным, непосредственно фиксируемых средствами объективного контроля) об условиях эксплуатации

мобильной канатной дороги, которые используются при моделировании рабочих процессов в основных, расчетных элементах.

2.3. Режимы эксплуатации мобильной канатной дороги

В процессе полного цикла эксплуатации мобильной канатной дороги структурно-функциональные компоненты могут выполнять различные функции с различными параметрами внешнего воздействия. Детализация во времени этих функций, физической природы и уровней внешнего воздействия позволяет выявить следующие штатные и нештатные режимы работы, требующие индивидуального рассмотрения при создании цифрового двойника мобильной канатной дороги.

Штатные режимы эксплуатации мобильной канатной дороги:

- режим транспортировки мобильного комплекса к месту развертывания (режим Рт);
- режим установки и фиксации концевой опоры мобильного комплекса в рабочем положении (режим Рм);
- режим навешивания канатной системы (режим Рн);
- рабочий режим мобильной канатной дороги (режим Рр);
- режим демонтажа канатной системы (режим Рд);
- режим перевода основного технологического оборудования мобильного комплекса в транспортное положение (режим Рп).

Нештатный режим эксплуатации мобильной канатной дороги:

- аварийный режим работы мобильной канатной дороги (режим Ра).

В табл. 1 приведены данные о возможном функционировании расчетных элементов при различных штатных режимах эксплуатации мобильной канатной дороги.

Режим транспортировки мобильного комплекса к месту развертывания (режим Рт) определяет рабочие процессы, происходящие в расчетных элементах компонента I мобильной канатной дороги (табл. 1). Он характеризуется случайным чередованием ос-

новных режимов движения самоходного шасси, в числе которых целесообразно рассматривать такие, как [33]:

- стоянку;
- разгон;
- движение с постоянной скоростью;
- притормаживание;
- полное служебное торможение;
- экстренное торможение.

Расчетные элементы структурно-функциональных компонентов II и III мобильной канатной дороги во время режима Рт не функционируют. Часть из них, преимущественно конструктивно связанные с несущей металлоконструкцией концевой опоры, занимают транспортное положение. Это обусловлено необходимостью соблюдения высотным габаритом мобильного комплекса требования нормативного габарита приближения по высоте с учетом требуемых зазоров [34], необходимого для безопасного проезда под мостовыми сооружениями и путепроводами при движении мобильного комплекса по автомобильным дорогам общего пользования, или максимального вертикального размера габарита подвижного состава [35], необходимого для безопасной перевозки мобильного комплекса железнодорожным транспортом. Расчетные элементы, подпадающие под требования безопасности автомобильной и железнодорожной транспортировки, и их транспортное положение на несущей раме самоходного шасси определяются по результатам предварительной компоновки основного технологического оборудования в зависимости от конструктивных особенностей крепления концевой опоры и способа ее перевода в рабочее положение [7, 12, 13, 27, 28].

Режим установки и фиксации концевой опоры мобильного комплекса в рабочем положении (режим Рм) и режим перевода основного технологического оборудования мобильного комплекса в транспортное положение (режим Рп) требуют функционирования, главным образом, таких расчетных элементов, как:

- силовая установка и устройство отбора мощности, обеспечивающие энергетические потребности компонентов II и III;

Таблица 1

Матрица признаков работы расчетных элементов при штатных режимах эксплуатации
мобильной канатной дороги

Компонент	Расчетный элемент	Признак работы элемента при режиме					
		РГ	РМ	РН	Рр	Рд	Рп
I	Силовая установка	+	+	+	+	+	+
	Несущая рама	+	+	+	+	+	+
	Трансмиссия	+	-	-	-	-	-
	Устройство отбора мощности	-	+	+	+	+	+
	Ходовая часть	+	-	-	-	-	-
	Тормозная система	+	-	-	-	-	-
	Кабина водителя	+	+	+	+	+	+
	Электрооборудование	+	+	+	+	+	+
	Система кондиционирования	+	-	-	+	-	-
	Выносные опоры	-	+	+	+	+	+
II, III	Концевая опора	-	+	+	+	+	+
	Насосная система	-	+	+	+	+	+
	Механизм установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении	-	+	+	+	+	+
	Механизм перемещения несущего тягового каната (приводной механизм)	-	-	+	+	-	-
	Механизм пространственной ориентации канатного шкива	-	-	+	+	-	-
	Механизм натяжения несущего тягового каната	-	-	+	+	+	-
	Система управления	-	+	-	+	-	+
	Тормозной механизм	-	+	-	-	-	+
	Дополнительные устройства, механизмы и системы	-	+	+	+	+	+
IV	Несущий, тяговый или несущего-тяговый канат	-	-	+	+	+	-
	Устройство для подвешивания транспортируемого груза	-	-	-	+	-	-
	Контрольно-диагностическая система мониторинга канатной системы	-	-	+	+	+	-
	Система безопасности движения транспортируемого груза	-	-	-	+	-	-

Примечание: «+» - признак работы расчетного элемента; «-» - признак отсутствия работы расчетного элемента.

- выносные опоры, обеспечивающие общую устойчивость мобильного комплекса против опрокидывания самоходного шасси под действием опрокидывающего момента от значительных горизонтальных монтажных нагрузок;

- концевая опора, изменяющая свою пространственную ориентацию от исходного, близкого к горизонтальному, транспортного

положения до конечного, близкого к вертикальному, рабочего положения;

- насосная система, механизм установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении и система управления, обеспечивающие подъем концевой опоры путем поворота ее металлоконструкции относительно цилиндрического шарнира крепления к несущей раме самоходного шасси.

Режим навешивания канатной системы (режим Рн) и режим демонтажа канатной системы (режим Рд) требуют функционирования, главным образом, таких расчетных элементов, как:

- силовая установка, устройство отбора мощности и насосная система, обеспечивающие энергетические потребности дополнительных устройств и систем компонентов II и III;

- несущая рама и концевая опора, воспринимающие нагрузки со стороны монтируемого (демонтируемого) компонента IV;

- выносные опоры, обеспечивающие общую устойчивость мобильного комплекса против опрокидывания самоходного шасси под действием опрокидывающего момента от значительных горизонтальных нагрузок со стороны монтируемого (демонтируемого) компонента IV;

- механизм натяжения несущего-тягового каната, обеспечивающий требуемую длину несущего-тягового каната с учетом его естественного провисания в пролете между концевыми опорами сопрягаемых мобильных комплексов;

- механизм пространственной ориентации канатного шкива, обеспечивающий согласование углов наклона плоскости канатного шкива и ветвей несущего-тягового каната вследствие его естественного провисания под собственным весом и весом транспортируемого груза и разности высотных отметок расположения сопрягаемых мобильных комплексов;

- дополнительные устройства и системы, задействованные при выполнении монтажных и демонтажных технологических операций по навешиванию и снятию несущего-тягового каната (или несущего и тягового канатов) между канатными шкивами сопрягаемых мобильных комплексов;

- несущий-тяговый канат.

В зависимости от используемой технологии навешивания (демонтажа) компонента IV также возможно использование и ряда других расчетных элементов, в частности, механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении, механизма перемещения

несущего-тягового каната, тормозного механизма.

Рабочий режим мобильной канатной дороги (режим Рр) требует функционирования, главным образом, таких расчетных элементов, как:

- силовая установка, устройство отбора мощности и насосная система, обеспечивающие энергетические потребности гидроприводов механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении, механизма перемещения несущего-тягового каната, механизма натяжения несущего-тягового каната (при гидравлическом способе натяжения каната) компонентов II и III;

- выносные опоры, обеспечивающие общую устойчивость мобильного комплекса против опрокидывания самоходного шасси под действием опрокидывающего момента от значительных горизонтальных эксплуатационных нагрузок (силы натяжения несущего каната, веса каната, транспортируемого груза и устройства для его подвески, ветрового давления);

- несущая рама и концевая опора, воспринимающие нагрузки со стороны монтируемого (демонтируемого) компонента IV;

- механизм установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении, механизм перемещения несущего-тягового каната и механизма натяжения несущего-тягового каната, обеспечивающие штатную работу компонента IV.

- несущий-тяговый канат, устройство для подвешивания транспортируемого груза, контрольно-диагностическая система мониторинга канатной системы и система безопасности движения транспортируемого груза.

3. Структура цифрового двойника мобильной канатной дороги

Цифровой двойник мобильной канатной дороги по своей сути представляет собой комплексную информационную математическую модель мобильной канатной дороги, имеющую многоуровневую иерархическую структуру и состоящую из совокупности информационных математических моделей более низкого уровня.

Структурно-функциональная схема цифрового двойника мобильной канатной дороги для штатного режима работы (т.е. аварийный

режим работы мобильной канатной дороги Ра не учитывается) представлена на рис. 5.

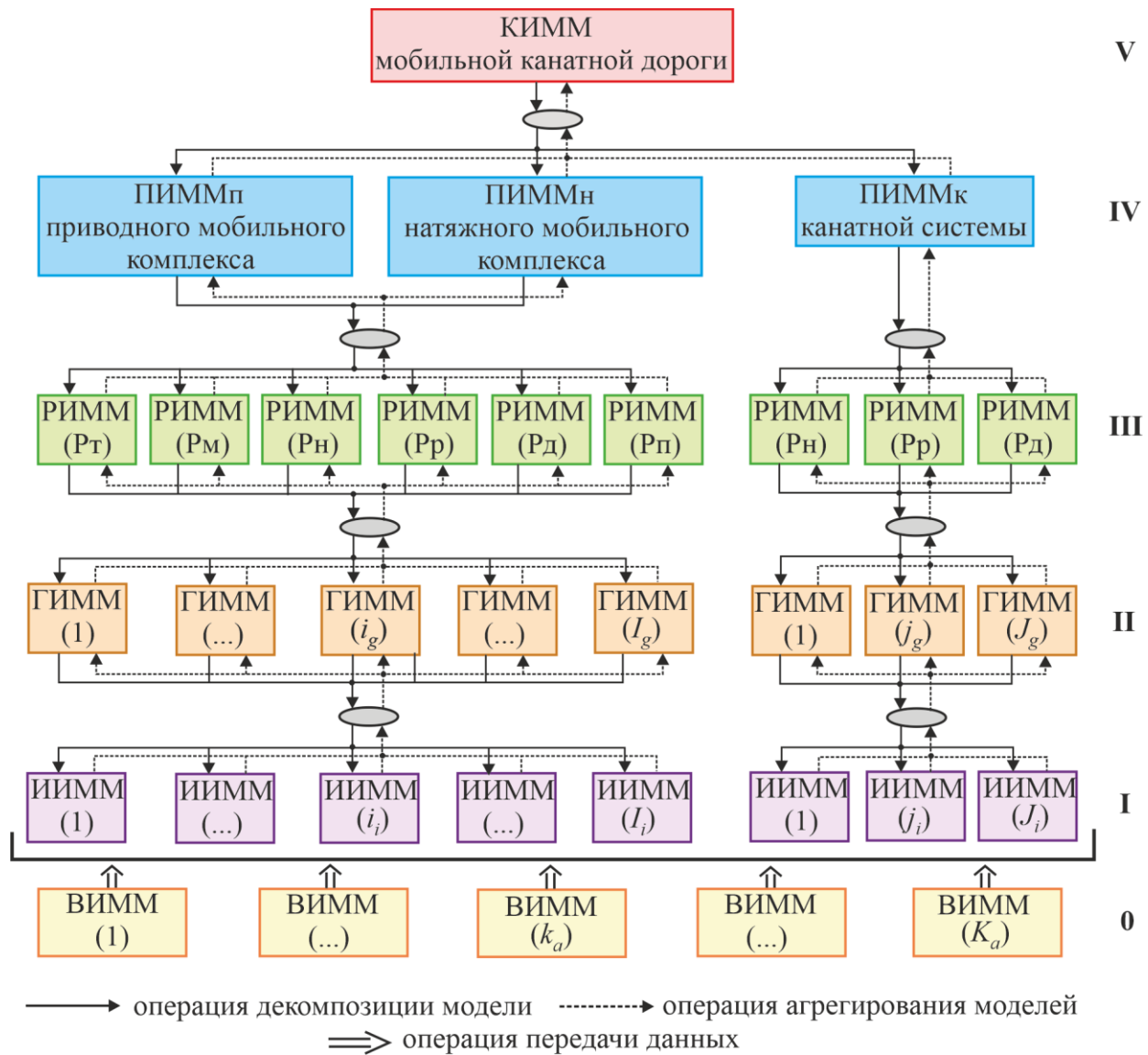


Рис. 5. Структурно-функциональная схема информационных моделей цифрового двойника мобильной канатной дороги для штатного режима работы

Данная схема построения цифрового двойника реализует системный подход, в настоящее время рассматриваемый как наиболее перспективный. При этом каждому расчетному структурному элементу компонентов мобильной канатной дороги, значащему с точки зрения его влияния на протекание физических рабочих процессов и потому учитываемому при математическом моделировании этих процессов, ставится в соответствие индивидуальная информационная ма-

тематическая подмодель, связанная с индивидуальными информационными моделями других расчетных структурных элементов с помощью совместных параметров и уравнений связи. Такой подход позволяет создавать удобные в использовании модульные информационные математические модели различной степени сложности, а также в наиболее корректно учитывать наличие реальных обратных связей между расчетными элементами мобильной канатной дороги.

В зависимости от своего функционального назначения информационные математические модели, входящие в состав цифрового двойника, разделяются на:

- вспомогательные информационные математические модели (ВИММ) уровня 0;
- индивидуальные информационные математические модели устройства или системы (ИИММ уровня I);
- групповые информационные математические модели устройств и (или) систем (ГИММ) уровня II;
- режимные информационные математические модели структурных компонентов (РИММ) уровня III, подразделяемые на:
 - режимные информационные математические модели мобильного комплекса (РИММм),
 - режимные информационные математические модели канатной системы (РИММк);
- полные информационные математические модели структурных компонентов (ПИММ) уровня IV, подразделяемые на:
 - полная информационная математическая модель приводного мобильного комплекса (ПИММп),
 - полная информационная математическая модель натяжного мобильного комплекса (ПИММн),
 - полная информационная математическая модель канатной системы (ПИММк).

Информационные математические модели каждого последующего, более высокого уровня формируются путем выполнения операции агрегирования двух или большего числа информационных математических моделей предыдущего, более низкого уровня. Это позволяет построить информационную математическую модель, учитывающую реально существующие физические взаимосвязи между несколькими расчетными структурными элементами и позволяющую повысить степень адекватности количественных результатов моделирования рабочих процессов.

В свою очередь, информационные математические модели каждого более высокого уровня путем выполнения операции декомпозиции разделяются на две или большее

число информационных математических моделей более низкого уровня, характеризующихся внутренним физическим единством с точки зрения математического моделирования конкретного рабочего процесса в конкретном структурно-функциональном компоненте. Это позволяет упростить построение информационной математической модели низшего уровня или использовать в ее качестве уже известную математическую модель аналогичного назначения.

Нижний уровень комплексной информационной математической модели мобильной канатной дороги (уровень I) формируется совокупностью индивидуальных информационных математических моделей всех расчетных структурных элементов, рассмотренных в разд. 2.2. Общее число таких моделей для приводного или натяжного мобильного комплекса составляет I_i , для канатной системы – J_i .

Каждая индивидуальная модель включает две связанные подмодели. Для расчетного элемента, представляющего собой устройство или механизм, одна из подмоделей представляет собой трехмерную геометрическую компьютерную модель этого элемента и конструкторско-технологической документации, разработанные на этапе проектирования и подготовки производства. Для расчетного элемента, представляющего собой систему (гидравлическую, пневматическую, электрическую, управляющую, диагностическую и др.), одна из подмоделей представляет собой схемную компьютерную модель этого элемента с определением всей номенклатуры используемых элементов (гидро- и пневмоаппаратов, устройств и машин, электрических и электронных устройств, датчиков и средств изменения и т.д.). Вторая подсистема любого расчетного элемента представляет собой расчетную компьютерную модель, которая позволяет на основе имитационного моделирования прогнозировать кинетику количественных параметров рабочих процессов, протекающих в расчетном элементе в различных режимах его работы с учетом известных значений исходных параметров.

Групповые информационные математические модели формируются путем проведе-

ния операции агрегирования индивидуальных информационных математических моделей двух и большего числа устройств и (или) систем уровня I. Общее число таких моделей для приводного или натяжного мобильного комплекса составляет I_g , для канатной системы – J_g .

При построении групповых моделей рассматриваются те расчетные элементы, которые функционируют одновременно в рамках конкретного режима работы мобильной канатной дороги (табл. 1). При этом выделяются те совместные количественные параметры, которые присутствуют в математических зависимостях для моделирования рабочих процессов в нескольких расчетных элементах, и которые формируют взаимные связи расчетных элементов. Эти совместные параметры для любого момента времени моделирования определяются согласно математическим зависимостям каждого расчетного элемента с последующим, при необходимости, итерационным согласованием полученных величин и перерасчетом остальных количественных параметров индивидуальных информационных математических моделей.

Как пример, рассмотрим формирование групповой модели вида

$$\text{ГИММ}(1) =$$

$\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{ко}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нс}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{yf}})$ (1) путем агрегирования индивидуальных моделей концевой опоры $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{ко}})$, насосной системы $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нс}})$ и механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{yf}})$ применительно к режиму установки и фиксации концевой опоры мобильного комплекса в рабочем положении (режим Рм) для конструктивного исполнения комплекса, показанного на рис. 2 и 3.

В качестве индивидуальной информационной математической модели концевой опоры $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{ко}})$ целесообразно использовать математическую модель определения кинематических и динамических параметров пространственного перемещения концевой опоры с центральным расположением на несущей раме самоходного шасси при ее установке в рабочее положение с помощью силового гидроцилиндра насосной системы мобильного комплекса, ранее разработанную в

[13, 36]. В качестве индивидуальной модели насосной системы $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нс}})$ в зависимости от принятой схемы частотно-дроссельного регулирования гидропривода целесообразно использовать одну из математических моделей – модель прогнозирования гидродинамических параметров насосной системы при последовательной относительно силового гидроцилиндра механизма подъема концевой опоры установке регулируемых дросселей [37] или модель прогнозирования гидродинамических параметров насосной системы при параллельной относительно силового гидроцилиндра механизма подъема концевой опоры установке регулируемого дросселя [38, 39]. В качестве индивидуальной модели механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{yf}})$ целесообразно использовать математическую модель силового расчета концевой опоры с центральным расположением на несущей раме самоходного шасси при ее установке в рабочее положение с помощью одиночного силового гидроцилиндра насосной системы мобильного комплекса, ранее разработанную в [7, 36]. Анализ указанных индивидуальных моделей позволяет сделать вывод об их взаимосвязанности и, следовательно, о правомерности объединения указанных индивидуальных моделей в единую групповую модель. В качестве объединительного начала выступает дифференциальное уравнение движения выходного звена силового гидроцилиндра вида [40]

$$\left(\frac{M_{red}}{A_{inp}} \right) \dot{Q}_{HD,inp} = (A_{inp}P_{inp} - A_{out}P_{out}) \mp F_{ol} - F_{br}, \quad (2)$$

где $Q_{HD,inp}$ – объемный расход рабочей жидкости, поданный в рабочую полость гидроцилиндра; A_{inp} , A_{out} – площадь поршня гидроцилиндра со стороны рабочей полости и со стороны холостой полости; P_{inp} , P_{out} – давление рабочей жидкости в рабочей полости и в холостой полости гидроцилиндра; M_{red} – приведенная к штоку гидроцилиндра полная масса концевой опоры; F_{ol} – эксплуатационные сила (включая инерционные нагрузки),

приведенная к штоку гидроцилиндра; F_{br} - сила торможения, создаваемая дополнительными внешними тормозными устройствами (при их наличии в конструкции механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении).

Уравнение (2) связывает количественные параметры всех объединяемых индивидуальных моделей: параметры A_{inp} и A_{out} устанавливаются геометрической подмоделью насосной системы; параметры p_{inp} , p_{out} и $Q_{HD,inp}$ - расчетной компьютерной подмоделью насосной системы; параметр M_{red} - геометрической подмоделью концевой опоры; параметры F_{ol} и F_{br} - совместно индивидуальными моделями концевой опоры и механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении. За исключением постоянных параметров геометрических подмоделей (A_{inp} , A_{out} , M_{red}) остальные параметры оказывают друг на друга переменное по величине взаимное влияние, обусловленное инерционными эффектами. Поэтому достоверный расчет параметров p_{inp} , p_{out} , $Q_{HD,inp}$, F_{ol} и F_{br} может быть выполнен только в рамках групповой информационной математической модели (1).

Режимные информационные математические модели уровня III формируются путем проведения операции агрегирования двух и более групповых информационных математических моделей уровня II и индивидуальных информационных математических моделей уровня I в рамках общего режима эксплуатации мобильной канатной дороги. Общее число таких моделей для приводного или натяжного мобильного комплекса составляет 6, для канатной системы - 3.

Как пример, рассмотрим формирование режимной модели для компонентов II и III применительно к рабочему режиму мобильной канатной дороги (режим Pp) для конструктивного исполнения мобильного комплекса, показанного на рис. 2 и 3. Агрегирование групповых и индивидуальных моделей позволяет построить режимную информационную модель следующего вида:

$$\begin{aligned} \text{РИММ}(Pp) = & \text{ГИММ}(1) \cup \text{ГИММ}(2) \cup \\ & \cup \text{ГИММ}(3) \cup \text{ГИММ}(4) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{зо}}) \cup \\ & \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{по}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нк}}), \quad (3) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \text{ГИММ}(1) = & \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нр}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{во}}) \\ & \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{ко}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нк}}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ГИММ}(2) = & \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{сy}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{ом}}) \cup \\ & \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нс}}); \end{aligned}$$

$$\text{ГИММ}(3) = \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нс}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нк}});$$

$$\text{ГИММ}(4) = \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{кб}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{ск}}).$$

Полные информационные математические модели мобильных комплексов и канатной системы уровня IV формируются путем объединения соответствующих режимных моделей. При этом режимные модели в рамках единой полной модели оказываются автономными, т.е. не связанными между собой взаимосвязанными количественными параметрами, так как в произвольный момент времени эксплуатации мобильной канатной дороги реализуется лишь один конкретный режим ее работы. Таким образом, полные модели мобильных комплексов и канатной системы могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{ПИММп} = & \text{РИММ}(P_T) + \text{РИММ}(P_M) + \\ & + \text{РИММ}(P_H) + \text{РИММ}(P_p) + \text{РИММ}(P_d) + \\ & + \text{РИММ}(P_n); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ПИММн} = & \text{РИММ}(P_T) + \text{РИММ}(P_M) + \\ & + \text{РИММ}(P_H) + \text{РИММ}(P_p) + \text{РИММ}(P_d) + \\ & + \text{РИММ}(P_n); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ПИММк} = & \text{РИММ}(P_H) + \text{РИММ}(P_p) + \\ & + \text{РИММ}(P_d), \end{aligned}$$

причем модели ПИММп и ПИММн отличаются только режимными моделями РИММ(Pp).

Формирование комплексной информационной математической модели мобильной канатной дороги уровня V вновь требует проведения операции агрегирования полных информационных математических моделей мобильных комплексов и канатной системы в рамках трех режимов работы:

- режима навешивания канатной системы (режим Pн);
- рабочего режима мобильной канатной дороги (режим Pp);
- режима демонтажа канатной системы (режим Pд).

Таким образом, комплексная модель мобильной канатной дороги может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \text{КИММ} = & [\text{ПИММ}_\text{п}(\text{Р}_\text{р}) \cup \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Р}_\text{р}) \cup \\ & \cup \text{ПИММ}_\text{к}(\text{Р}_\text{р})] + [\text{ПИММ}_\text{п}(\text{Р}_\text{н}) \cup \\ & \cup \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Р}_\text{н}) \cup \text{ПИММ}_\text{к}(\text{Р}_\text{н})] + \\ & + [\text{ПИММ}_\text{п}(\text{Р}_\text{д}) \cup \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Р}_\text{д}) \cup \\ & \cup \text{ПИММ}_\text{к}(\text{Р}_\text{д})] + \text{ПИММ}_\text{п}(\text{Р}_\text{т}) + \\ & \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Р}_\text{т}) + \text{ПИММ}_\text{п}(\text{Р}_\text{м}) + \\ & + \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Р}_\text{м}) + \text{ПИММ}_\text{п}(\text{Р}_\text{п}) + \\ & \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Р}_\text{п}). \end{aligned} \quad (4)$$

Для проведения моделирования работы мобильной канатной дороги с помощью ее цифрового двойника требуется дополнительная разработка вспомогательных информационных математических моделей уровня 0. Эти модели предназначены для определения необходимых исходных данных при использовании индивидуальных информационных математических моделей расчетных элементов структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги. Например, вспомогательная модель транспортируемого груза ВИММ(Э_{тр}) представляет собой геометрическую компьютерную модель, дающую трехмерное представление о конфигурации груза, его габаритных размерах, физико-механических характеристиках. Она позволяет оценивать такие количественные параметры, необходимые для использования цифрового двойника, как весовая и ветровая нагрузки на несущий канат, инерционные характеристики и др. Вспомогательная модель опорной поверхности ВИММ(Э_{оп}) содержит информацию о физико-химических и механических характеристиках грунта площадки для размещения мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса и позволяет оценивать такие необходимые для индивидуальных моделей расчетных структурных элементов количественные параметры, как проседание самоходных шасси, несущая способность анкерных устройств выносных опор и др.

4. Заключение

Представленный выше концептуальный подход, основанный на системном представлении и анализе конструктивного исполне-

ния и режимов эксплуатации мобильных канатных дорог на базе концевых мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, является эффективным средством при разработке цифровых двойников мобильных канатных дорог. Разработанная многоуровневая иерархическая структура включает информационные математические модели различного функционального назначения и различной степени взаимной связности, распределенные по уровням структуры в зависимости от степени сложности и возможности дальнейшего их агрегирования в информационные математические модели более высокого уровня. Индивидуальные информационные математические модели, являясь базовыми информационными математическими моделями низшего уровня и позволяющие моделировать рабочие процессы в отдельных расчетных структурных элементах, путем их агрегирования на основе учета уравнений связи и совпадающих количественных параметров прогнозируемых процессов формируют групповые информационные математические модели, а затем – режимные и полные информационные математические модели структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги.

Данный системный подход и разработанная на его основе многоуровневая иерархическая структура цифрового двойника позволяют при разработке цифровых двойников мобильных канатных дорог получить практически полезные результаты, включая:

- модульность создания цифрового двойника на основе разработки новых или использования уже известных методов моделирования технических устройств и систем с их оформлением в виде индивидуальных информационных математических моделей;
- сравнительную простоту модификации цифрового двойника применительно к мобильным канатным дорогам иного конструктивного исполнения;
- возможность использования ранее разработанных информационных математических моделей для аналогичных расчетных структурных элементов.

Список литературы

1. Hoffmann K. Recent developments in cable-drawn urban transport systems // *FME Transactions*. 2006. Vol. 34. P. 205-212.
2. Nikšić M., Gašparović S. Geographic and traffic aspects of possibilities for implementing ropeway systems in passenger transport // *Promet-Traffic Transp.* 2010. Vol. 22. No. 5. P. 389–398 DOI: 10.7307/ptt.v22i5.204
3. Vuchic V.R. *Urban Transit Systems and Technology*. NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 614 p.
4. Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S., Othman F. Aerial Ropeway Transportation Systems in the Urban Environment: State of the Art // *J. of Transportation Engineering*. 2012. Vol. 138. No. 3. P. 253-262. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000330
5. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи В.С., Лагереv 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.
6. Visser R., Obi O.F. Automation and Robotics in Forest Harvesting Operations: Identifying Near-Term Opportunities // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2017. Vol. 42. No. 1. P. 13-24. DOI: 10.5552/crojfe.2021.739
7. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Конструкции и основы проектирования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2020. 207 с.
8. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Prospects for the use of mobile ropeways in the elimination of the consequences of natural and man-made disasters // *Proceedings of the 8th Congress on Scientific Researches and Recent Trends*. Zambales, Philippines, August 2-4, 2021. P. 58.
9. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann Ju. Experimentable Digital Twins - Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0 // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. Vol. 14. No. 4. P. 1722-1731. DOI: 10.1109/TII.2018.2804917
10. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.

References

1. Hoffmann K. Recent developments in cable-drawn urban transport systems. *FME Transactions*, 2006, Vol. 34, pp. 205-212.
2. Nikšić M., Gašparović S. Geographic and traffic aspects of possibilities for implementing ropeway systems in passenger transport. *Promet-Traffic Transp.* 2010, Vol. 22, No. 5, pp. 389–398. DOI: 10.7307/ptt.v22i5.204
3. Vuchic V.R. *Urban Transit Systems and Technology*. NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 614 p.
4. Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S., Othman F. Aerial Ropeway Transportation Systems in the Urban Environment: State of the Art. *J. of Transportation Engineering*, 2012, Vol. 138, No. 3, pp. 253-262. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000330
5. 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: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913> (In Russian)
6. Visser R., Obi O.F. Automation and Robotics in Forest Harvesting Operations: Identifying Near-Term Opportunities. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, Vol. 42, No. 1, pp. 13-24. DOI: 10.5552/crojfe.2021.739
7. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruksii 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. (In Russian)
8. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Prospects for the use of mobile ropeways in the elimination of the consequences of natural and man-made disasters. In: *Proceedings of the 8th Congress on Scientific Researches and Recent Trends*. Zambales, Philippines, August 2-4, 2021. P. 58.
9. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann Ju. Experimentable Digital Twins - Streamlining Simulation-Based Systems Engi-

11. 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. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-243-251

12. Лагерев И.А., Лагерев 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

13. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. 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.

14. Пат. 200827 Российская Федерация, МПК В61В 7/06. Самоходная концевая станция / Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И.; заявитель и патентообладатель ФБГОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского». - № 2020117118; заявл. 12.05.2020; опубл. 12.11.2020, Бюл. № 32.

15. Лагерев И.А., Лагерев А.В. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Конструкции и условия эксплуатации. Брянск: РИО БГУ, 2018. 190 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1294622>.

16. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Влияние параметров рельефа на выбор оптимального шага промежуточных опор вдоль линии канатного метро // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2017. № 3. С. 253-272. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272

17. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Моделирование рабочих процессов мобильных транспортно-перегрузочных ка-

neering for Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, Vol. 14, No. 4, pp. 1722-1731. DOI:10.1109/TII.2018.2804917

10. Prokhorov A., Lysachev M. *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt* [Digital twin. Analysis, trends, world experience]. Moscow, ООО «AlyansPrint», 2020. 401 p. (In Russian)

11. 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)

12. 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)

13. 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)

14. Patent RU 200827, B61B 7/06. *Samokhodnaya kontsevaya stantsiya* [Self-propelled terminal station]. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Declared 12.05.2020. Published 12.11.2020. (In Russian)

15. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Sovremennaya teoriya manipulatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselevykh transportno-tehnologicheskikh mashin i kompleksov. Konstruktsiya i usloviya ekspluatatsii* [Modern theory of manipulation systems of mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes. Design and operating conditions]. Bryansk, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, 2018. 190 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1294622> (In

натных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2021. 204 с.

18. Аксенов П.В. Многоосные автомобили. М.: Машиностроение, 1989. 280 с.

19. Антонов А.С., Голяк В.К. Армейские автомобили: конструкция и расчет. Часть первая: типы автомобилей, компоновка, силовые передачи. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1970. 542 с.

20. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 728 с.

21. Бочаров Н.Ф., Цитович И.С., Полунгян А.А., Семенов В.М., Цыбин В.С., Жеглов Л.Ф. Конструирование и расчет колесных машин высокой проходимости. М.: Машиностроение, 1983. 299 с.

22. Веселов Н.Б. Вездеходные транспортно-технологические машины. Конструкции. Конструирование и расчет. Нижний Новгород: РИ «Бегемот», 2010. 320 с.

23. Гладов Г.И., Вихров А.В., Зайцев С.В., Кувшинов В.В., Павлов В.В. Конструкции многоцелевых гусеничных и колесных машин. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 400 с.

24. Гладов Г.И., Вихров А.В., Кувшинов В.В., Павлов В.В. Многоцелевые гусеничные и колесные машины: Конструкция. М.: Транспорт, 2001. 272 с.

25. Пойченко В.В., Кондрашов П.В., Потемкин С.В., Пойченко О.В., Хабарова Т.С. Современные грузовые автотранспортные средства: Справочник. М.: Агентство «Доринформсервис», 2004. 592 с.

26. Проектирование полноприводных колесных машин: в 3-х т. Т.1 / под ред. А.А. Полунгяна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 496 с.

27. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Предварительная компоновка основного технологического оборудования самоходной машины мобильной канатной дороги со штанговым механизмом установки и фиксации концевой опоры // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №4. С. 336-347. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-336-347

28. Лагереv И.А., Таричко В.И., Лагереv

(Russian)

16. Lagerev A.V., Lagerev I.A. The effect of topography on the choice of optimal step intermediate supports along the line of the cable metro. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.3, pp. 253-272. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272 (In Russian)

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. Aksekov P.V. *Mnogoosnye avtomobili* [Multi-axle cars]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 280 p. (In Russian)

19. Antonov A.S., Golyak V.K. *Armeyskie avtomobili: konstruktsiya i raschet. Ch. I: tipy avtomobiley, komponovka, silovye peredachi* [Army vehicles: design and calculation. Part I: types of cars, layout, power transmission]. Moscow, Voennoe izdatelstvo Ministerstva obrony SSSR, 1970. 542 p. (In Russian)

20. Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bolshoy gruzopodemnosti* [Wheeled vehicles of extra heavy duty]. Moscow, Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Baumana, 2006. 728 p. (In Russian)

21. Bocharov N.F., Tsitovich I.S., Polungyan A.A., Semenov V.M., Tsybin V.S., Zheglov L.F. *Konstruirovaniye i raschet kolesnykh mashin vysokoy prokhodimosti* [Design and calculation of high-traffic wheeled vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 299 p. (In Russian)

22. Veselov N.B. *Vezdekhodnye transportno-tekhnologicheskie mashiny. Konstruktsii. Konstruirovaniye i raschet* [All-terrain transport and technological vehicles. Constructions. Design and calculation]. Nizhniy Novgorod, RI Begemot, 2010. 320 p. (In Russian)

23. Gladov G.I., Vikhrov A.V., Zaytsev S.V., Kuvshinov V.V., Pavlov V.V. *Konstruktsii mnogotselovykh gusenichnykh i kolesnykh mashin* [Designs of multipurpose

А.В. Обеспечение вертикального габарита самоходной машины со штанговым механизмом установки и фиксации концевой опоры для мобильной канатной дороги // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2021. - №2. – С. 141-152. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-02-141-152

29. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.-Л.: Машиностроение, 1966. 484 с.

30. Канатная дорога [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Канатная_дорога (Дата обращения: 20.11.2020).

31. Справочник проектировщика промышленных, жилых и гражданских зданий и сооружений. Промышленный транспорт. М.: Стройиздат, 1984. 231 с.

32. Логвинов А.С., Короткий А.А. Пассажирские одноканатные дороги. Устройство и эксплуатация. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2016. 210 с.

33. Таричко В.И., Лагереv И.А., Черных А.А. Компьютерное моделирование режимов движения мобильной транспортно-технологической машины // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 136-143. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-136-143.

34. ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. Введ. 2008-01-01. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.

35. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 211 с.

36. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. (2022) Kinematic and Force Analysis of the End Tower Positioning Mechanism at Mobile Ropeway // Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_46

37. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv

tracked and wheeled vehicles]. Moscow, Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2010. 400 p. (In Russian)

24. Gladov G.I., Vikhrov A.V., Kuvshinov V.V., Pavlov V.V. *Mnogotsel'nyye gusenichnyye i kolesnyye mashiny: Konstruktsiya* [Multi-purpose tracked and wheeled vehicles: Construction]. Moscow, Transport, 2001. 272 p. (In Russian)

25. Poychenko V.V., Kondrashov P.V., Potemkin S.V., Poychenko O.V., Khabarova T.S. *So-vremennyye gruzovyye avtotransportnyye sredstva: Spravochnik* [Modern cargo vehicles: Guide]. Moscow, Agentstvo «Dorinform-servis», 2004. 592 p. (In Russian)

26. *Proektirovaniye polnoprivodnykh kolyosnykh mashin: v 3 t. T.1* [Design of four-wheel drive wheeled vehicles: in 3 vols. Vol.1]. Ed. A.A. Polungyan. Moscow, Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2008. 496 p. (In Russian)

27. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Preliminary layout of the main technological equipment of a self-propelled machine with a rod mechanism for installing and fixing the end tower for a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.4, pp. 336-347. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-336-347 (In Russian)

28. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Providing the vertical dimension of a self-propelled machine with a rod mechanism for installing and fixing the end tower for a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.2, pp. 141-152. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-07-02-141-152 (In Russian)

29. Dukelskiy A.I. *Podvesnyye kanatnyye dorogi i kabelnyye krany* [Overhead cableways and cable cranes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroeniye, 1966. 484 p. (In Russian)

30. *Kanatnaya doroga* [site]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Канатная_дорога (Дата обращения: 20.02.2021) (accessed 03 Jan. 2022). (In Russian)

31. *Spravochnik proektirovshchika. Promyshlennyy transport* [Designer reference. Industrial transport]. Eds. A.S. Gelman, S.D. Chubarov. Moscow, Stroyizdat, 1984. 231 p.

И.А. Моделирование режимов работы гидроприводов 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.

38. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Работа гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных канатных комплексов при последовательной установке дресселей // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 73-92. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-73-92.

39. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol.1753. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012022.

40. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Моделирование рабочих процессов в дрессельно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. №4. С. 355-379. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379.

(In Russian)

32. Logvinov A.S., Korotkiy A.A. *Passazhirskie odnokanatnye dorogi. Ustroystvo i ekspluatatsiya* [Passenger ropeways with single rope. Device and operation]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2016. 210 p. (In Russian)

33. Tarichko V.I., Lagerev I.A., Chernykh A.A. Motion modes simulation of a mobile transport and technological machine. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp. 136-143. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-136-143 (In Russian)

34. GOST R 52748-2007 Automobile roads of the general using. Standard loads, loading systems and clearance approaches. Moscow, Standartinform, 2008. 16 p. (In Russian)

35. GOST 9238-2013 Construction and rolling stock clearance diagrams. Moscow, Standartinform, 2014. 211 p. (In Russian)

36. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. (2022) Kinematic and Force Analysis of the End Tower Positioning Mechanism at Mobile Ropeway. In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_46

37. 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: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480 (In Russian)

38. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. The operation of hydraulic drives with frequency-throttle regulation for mobile rope complexes with the consistent installation of throttles. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp. 73-92. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-73-92 (In Russian)

39. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex. *Journal of Physics: Confer-*

† *ence Series*, 2021, Vol.1753, 012022. DOI:
† 10.1088/1742-6596/1753/1/012022.

† 40. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Modeling
† of working processes in the throttle-adjustable
† hydraulic drive of manipulation systems with
† separate movement of links during operation of
† mobile machines. *Nauchno-tekhnicheskiy*
† *vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo*
† *universiteta*, 2018, No.4, pp. 355-379. DOI:
† [https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-](https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379)
† 04-355-379 (In Russian)