

УДК (UDC) 621.86

КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСАCOMPREHENSIVE MODEL OF THE MOBILE TRANSPORT AND OVERLOADING  
ROPE COMPLEXТаричко В.И.<sup>1</sup>, Химич А.В.<sup>2</sup>  
Tarichko V.I.<sup>1</sup>, Khimich A.V.<sup>2</sup><sup>1</sup> – АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)<sup>2</sup> – Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)<sup>1</sup> – Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)<sup>2</sup> – Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье рассматривается структура комплексной математической модели для исследования рабочих процессов и динамической нагруженности мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Она включает в себя отдельные математические подмодели, предназначенные для учета влияния элементов подсистемы на работу системы в целом. В рамках предложенной комплексной модели используются подмодели деформируемого опорного основания, базового шасси, канатной системы, грузовой кабины с подвеской. Учитываются отличия в работе приводных и неприводных базовых станций. Подмодели связаны между собой совместными параметрами, что позволяет учитывать при моделировании наличие обратных связей между подсистемами.

**Ключевые слова:** мобильная канатная дорога, расчет, комплексная математическая модель.

**Дата принятия к публикации:** 25.09.2019  
**Дата публикации:** 25.12.2019

**Сведения об авторах:**

**Таричко Вадим Игоревич** – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – главный конструктор АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: 32.6909@mail.ru.

**Химич Анна Васильевна** – студент ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: annahimich14@mail.ru.

**Abstract.** The article considers the structure of a comprehensive mathematical model for the study of working processes and dynamic load of mobile ropeways. The complex mathematical model includes separate mathematical sub-models designed to take into account the influence of subsystem elements on the operation of the system. Within the framework of the proposed complex model, sub-models of deformable support surface, base chassis, ropeway's equipment, cable system, cargo cabin with suspension are used. The differences in the operation of the drive and non-drive base stations of the mobile ropeway are taken into account. Sub-models are interconnected by joint parameters, which allows to take into account the presence of feedbacks between subsystems when modeling.

**Keywords:** mobile ropeway, analysis, comprehensive mathematical model.

**Date of acceptance for publication:** 25.09.2019  
**Date of publication:** 25.12.2019

**Authors' information:**

**Vadim I. Tarichko** – Candidate of Technical Sciences, Deputy general director – General designer, Bryansk Automobile Plant JSC, e-mail: 32.6909@mail.ru.

**Anna V. Khimich** – student, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: annahimich14@mail.ru.

**1. Введение**

Мобильные транспортно-перегрузочные канатные комплексы на базе различных шасси предназначены для перевозки грузов и пассажиров в сложных условиях. Они могут быть использованы при строительстве объектов нефте- и газотранспортных систем, ликвидации последствий стихийных бедствий,

при освоении труднодоступных и арктических земель [1-4].

В основу разработки комплексной математической модели мобильной канатной дороги положена методология, предложенная И.А. Лагеревым [5, 6], а также научные подходы к исследованию систем непрерывного транспорта с распределенным приводом, предложенные в работе [7].

Комплексная математическая модель транспортной системы – это совокупность взаимосвязанных математических моделей ее основных подсистем, позволяющая учесть различные варианты конструктивного исполнения и функционального назначения транспортной системы. Комплексная математическая модель должна обеспечивать оценку параметров нагруженности при выполнении различных технологических операций, на основе которых можно оценить динамику, прочность, долговечность и другие эксплуатационные свойства объекта [5, 6].

Первые попытки создания комплексной математической модели мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса были сделаны в [8]. Однако ее структура не соответствует реальным условиям размещения оборудования канатной дороги на колесных шасси, так как предполагает использование электропривода ведущего шкива. Также не в полной мере учтены все механизмы мобильного канатного комплекса и варианты их работы.

С помощью комплексной математической модели возможно смоделировать реализации процесса изменения характеристик нагруженности (динамических усилий в характерных точках конструкции). В дальнейшем с помощью метода конечных элементов возможно оценить динамическое напряженно-деформированное состояние конструкции с целью оценки прочности и жесткости ее несущих элементов [9-12].

## 2. Структурная схема исследуемой системы

Для построения комплексной математической модели используется системный подход, согласно которому мобильный транспортно-перегрузочный канатный комплекс представляет собой совокупность подсистем, выполняющих отдельные функции. При этом функционал системы в целом не является суммой функций отдельных подсистем, что обуславливает необходимость создания комплексной математической модели [13-15].

Структурная схема исследуемой системы приведена на рис. 1. Он включает в себя не-

сколько базовых канатных станций (как правило, приводную и неприводную), оборудование которых смонтировано на базе мобильных транспортных машин (базовых шасси) [1-4]. На базовом шасси устанавливается двигательная установка (двигатель внутреннего сгорания) и трансмиссия. Трансмиссия может быть механической, гидравлической и гидромеханической [8].

В качестве базового шасси мобильного канатного комплекса (подсистема II) может использоваться колесное, гусеничное и плавающее транспортное средство. Для каждого типа шасси используется собственная математическая модель, учитывающая особенности взаимодействия движителя с деформируемым опорным основанием (подсистема I), а также особенности работы подвески [8]. С деформируемым опорным основанием также взаимодействуют различные опоры (аутригеры), дополнительные анкерные устройства и мачты, входящие в состав базового шасси.

В зависимости от количества осей могут использоваться различные подходы к построению уравнений движения колесных шасси, отличающиеся способом определения динамических и статических сил реакции на колесах [16-18].

Канатная система (подсистема III) может иметь различную структуру. Она включает тяговый, несущий (или комбинированный несуще-тяговый) канаты; натяжное устройство; приводной шкив; несущие конструкции (в том числе неприводной шкив), на которые крепятся канты [19-21]. Существуют четыре основных типа канатных систем.

I тип – одноканатная система с маятниковым движением грузовых кабин, закрепленных на кольцевом несуще-тяговом канате фиксированными зажимами (захватами). Можно выделить два подтипа этой канатной системы:

- I.1 – с кольцевым (НТк);
- I.2 – с линейным (НТл) несуще-тяговым канатом.

Подтип I.2 не свойственен для подвесных канатных дорог, но похожая конструкция буксировочных канатных дорог может применяться в мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексах. Подтип I.1

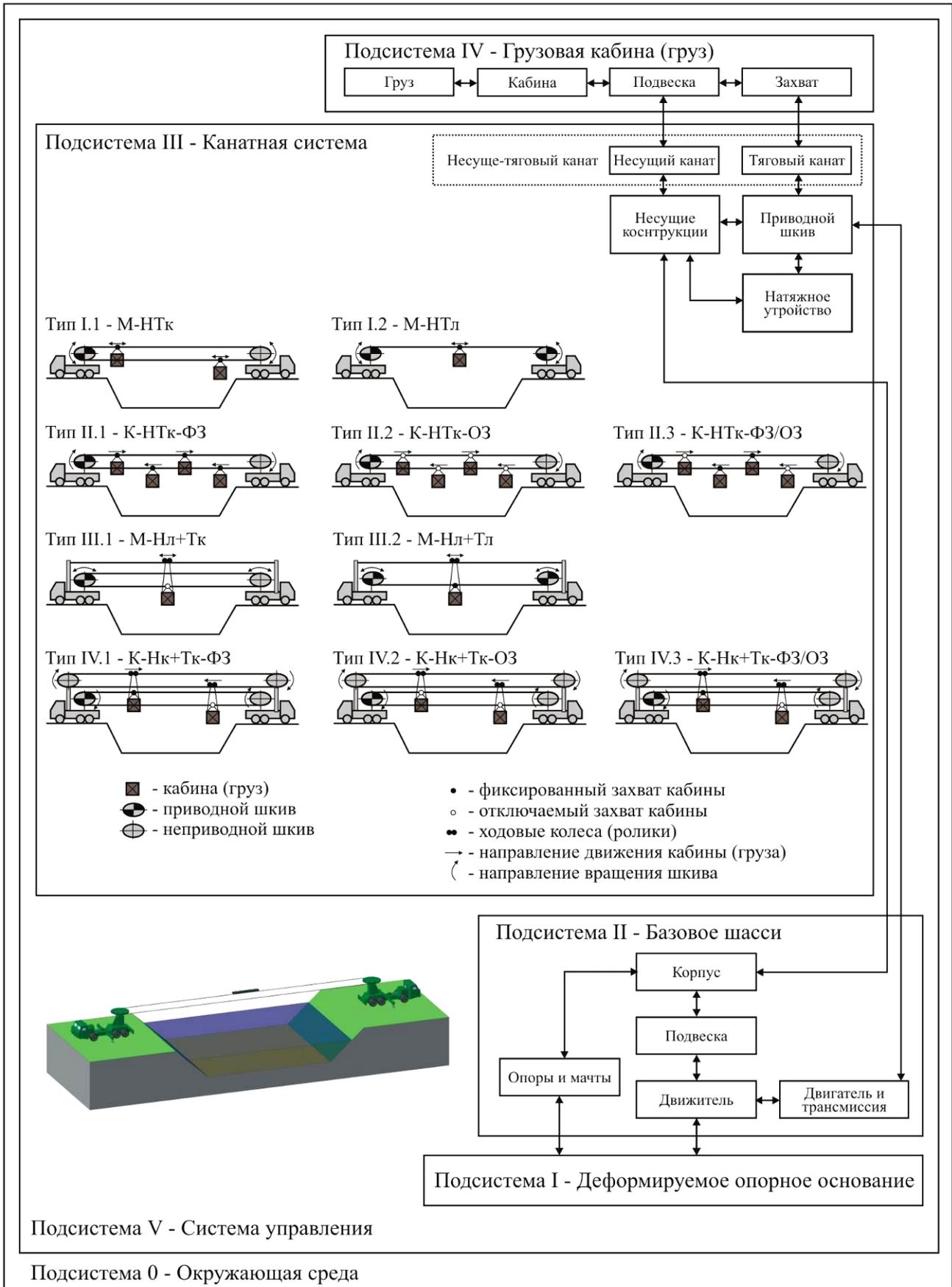


Рис. 1. Структурная схема мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса

позволяет одновременно перемещать только одну грузовую кабину (груз), поэтому больше подходит для перевозки грузов, преимущественно в одну сторону, например, при доставке материалов к месту строительства. Для обеспечения маятникового движения приводной шкив канатной системы вращается в различные стороны.

II тип – одноканатная система с кольцевым движением грузовых кабин, закрепленных на кольцевом несущем-тяговом канате фиксированными (тип II.1) или отключаемыми (тип II.2) зажимами. Возможно применение на одном мобильном канатном комплексе кабин (грузов) с фиксированными или отключаемыми зажимами (тип II.3). Несмотря на незначительные отличия в конструкции кабин, тип зажима принципиально важен, так как это оказывает существенное влияние на динамику системы в целом. Кабины с фиксированными зажимами также могут быть отделены от каната, но это происходит при демонтаже или обслуживании, а не во время работы мобильного канатного комплекса, поэтому не оказывает влияния на рабочие процессы. Привод канатной системы вращается в одну сторону (по или против часовой стрелки).

III тип – двухканатная система с маятниковым движением грузовых кабин, перемещающихся на ходовых колесах (роликах) по жестко закрепленному линейному несущему канату (Нл), приводимых в движение: для типа III.1 кольцевым тяговым канатом (Тк), для типа III.2 – линейным (Тл) тяговым канатом. При использовании кольцевого тягового каната необходимо наличие отключаемого зажима, позволяющего остановить кабину при достижении точки А или Б. При использовании линейного тягового каната наличие отключаемого зажима не требуется.

IV тип – двухканатная система с кольцевым движением грузовых кабин, перемещающихся на ходовых колесах по кольцевому несущему канату (Нк), приводимых в движение кольцевым тяговым канатом (Тк). Также как и для типа II, возможны различные комбинации типа зажима, с помощью которого кабина подключается к тяговому канату.

Для модернизации городских транспортных систем был предложен новый класс многоприводных канатных систем [21]. Однако в составе мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса такие конструкции неприменимы.

По канатной системе передвигается грузовая кабина или груз (подсистема IV). Подвеска кабины связана с несущим канатом (для передачи веса груза на опорные конструкции) и с помощью захвата с тяговым канатом (для сообщения движения). Захват может быть фиксированным или отключаемым, что позволяет остановить движение кабины без остановки вращения приводного шкива [8].

Мобильный транспортно-перегрузочный канатный комплекс управляется автоматической или ручной системой управления (подсистема V).

Внешняя среда (подсистема 0) оказывает влияние на рабочие процессы системы.

### 3. Структурная схема комплексной математической модели мобильного канатного комплекса

Структурная схема комплексной математической модели мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса приведена на рис. 2. Стрелками показаны взаимные связи математических подмоделей отдельных систем мобильного канатного комплекса, показанных на рис. 1.

Возможны различные варианты исполнения мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. Например, нагрузки с несущего каната могут передаваться как на корпус базового шасси, так и на напрямую на опорное основание. Приводной шкив может приводиться в движение механической или гидромеханической трансмиссией. От конструктивного исполнения элемента мобильного канатного комплекса зависит выбор варианта его математической модели в составе комплексной модели. Основные варианты конструкции мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса показаны на рис. 2 зелеными стрелками, воз-

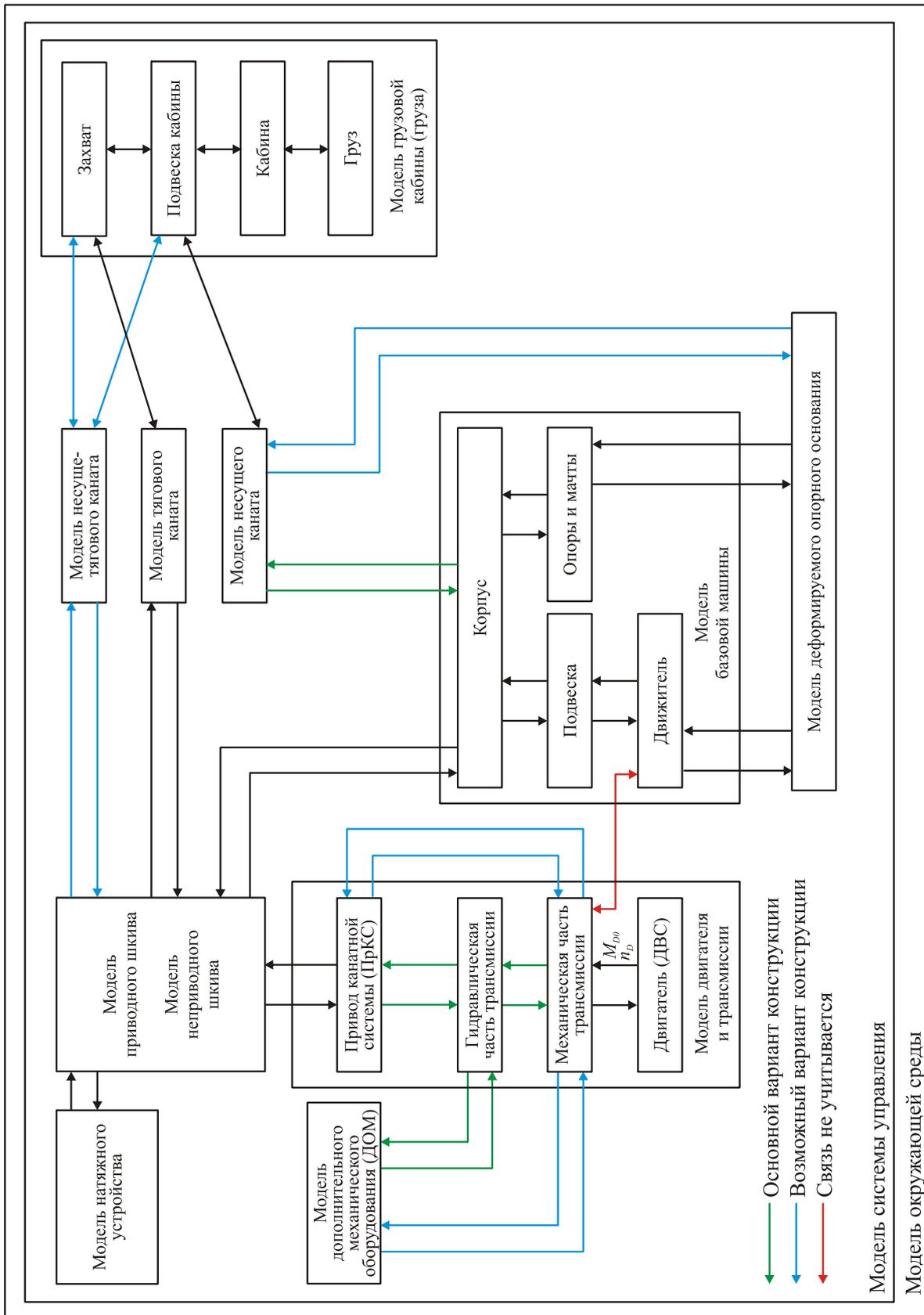


Рис. 2. Структурная схема комплексной математической модели

возможные альтернативные варианты конструкции – голубыми стрелками.

При работе мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса базовые шасси неподвижны, так как только в этом случае можно обеспечить их устойчивость и выполнить натяжение канатной системы. Следовательно, энергия двигательной установки передается на привод канатной системы. Поэтому неподвижной является часть трансмиссии базового шасси от коробки отбора мощности или раздаточной коробки, от которой приводится в движение оборудование канатной системы (красная стрелка на рис. 2).

Разработанная комплексная математическая модель мобильного канатного комплекса представляет собой совокупность дифференциальных уравнений движения и уравнений связи, учитывающих взаимодействие отдельных подсистем. При этом использовались ранее известные математические модели подсистем I и II [18].

Уравнения движения, входящие в комплексную математическую модель, в общем виде можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} [M]\{\ddot{x}\} + [B]\{\dot{x}\} + [C]\{x\} = \{P\}, \\ [F] = \{0\}, \end{cases}$$

где  $\{x\}$  – вектор законов движения элементов системы (изменения их координат во времени);  $\{\dot{x}\}$  – вектор скоростей элементов системы;  $\{\ddot{x}\}$  – вектор ускорений элементов системы;  $[M]$  – матрица инерционных параметров системы, зависящая от масс и моментов инерции элементов системы;  $[B]$  – матрица коэффициентов диссипации;  $[C]$  – матрица упругости, зависящая от жесткостей элементов системы;  $\{P\}$  – вектор внешних нагрузок на элементы системы;  $[F]$  – матрица алгебраических уравнений связи параметров системы:  $F_i = F(\{x\}, \{\dot{x}\}, \{\ddot{x}\})$ .

Уравнения движения системы интегрируются численно, что позволяет определить значения векторов  $\{x\}$ ,  $\{\dot{x}\}$  и  $\{\ddot{x}\}$ .

#### 4. Пример использования комплексной математической модели мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса

С использованием предложенного подхода исследована динамика мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса со следующими параметрами:

- длина пролета 50 м;
- высота приводного шкива над уровнем земли 6 м;
- высота неприводного шкива над уровнем земли 4 м;
- масса грузовой кабины 600 кг;
- жесткость каната 100 кН/м;
- начальное натяжение канатной системы 10 кН.

В качестве базовых шасси для приводной и неприводной станций использовались одинаковые трехосные колесные грузовые автомобили КамАЗ-53215 с собственной массой 10500 кг. Опорное основание представляло собой горизонтальную асфальто-бетонную поверхность. Численное интегрирование проводилось в программном комплексе собственной разработки с шагом интегрирования по времени 0,001 с.

График силы натяжения набегающей и сбегавшей ветвей каната исследуемого мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса приведен на рис. 3. Моделировался следующий режим движения канатной системы:

- разгон;
- равномерное движение (движение с постоянной скоростью);
- торможение с последующей полной остановкой канатной системы.

#### 5. Основные выводы

1. Разработанная комплексная математическая модель позволяет исследовать рабочие процессы мобильного транспортно-технологического комплекса с учетом взаимодействия между отдельными подсистемами.

2. Теоретически установлено, что для мобильных канатных комплексов, представляющих собой подвесные канатные дороги,

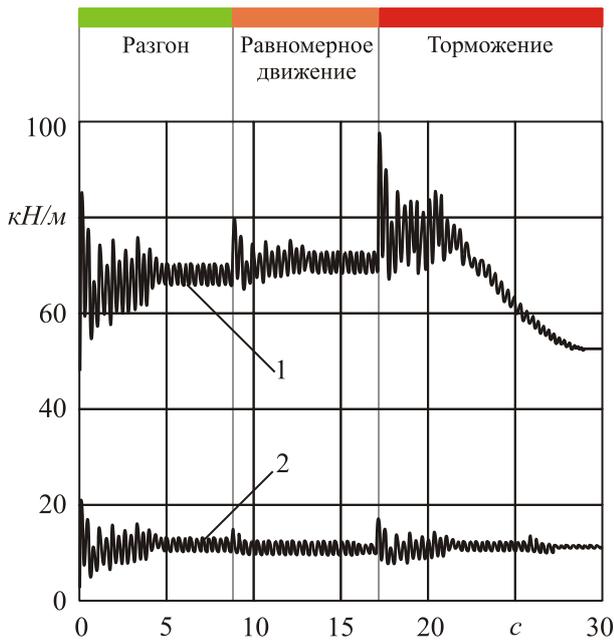


Рис. 3. График силы натяжения каната мобильного канатного комплекса:  
 1 – сбегаящая ветвь каната;  
 2 – набегающая ветвь каната

силы натяжения каната выше, чем для буксировочных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Для рассмотренного мобильного канатного комплекса сила натяжения сбегаящей нити каната при начале движения составляет 62 кН. Если бы груз перемещался по земле, то это усилие было бы равно 38 кН.

3. Основные направления дальнейших исследований – совершенствование отдельных математических подмоделей, входящих в комплексную модель, а также поиск с помощью комплексной модели количественных и качественных особенностей работы мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов в различных эксплуатационных режимах.

### Список литературы

1. Пат. 2337023 Рос. Федерация: МПК7 В61В 7/00. Мобильная подвесная канатная дорога / Короткий А.А., Хальфин М.Н., Маслов В.Б. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2007102705/11; заявл. 24.01.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. 30.

2. Пат. 2465423 Рос. Федерация: МПК7 E04H 3/14. Стадион / Короткий А.А., Приходько В.М. Кустарев Г.В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2011112660/03; заявл. 01.04.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. 30.

3. Лагереv А.В., Таричко В.И., Солдатченков С.П. Обеспечение общей устойчивости базовых колесных станций мобильных канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 210-220. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220>.

4. Лагереv И.А., Таричко В.И., Солдатченков С.П., Игнатов Д.А. Создание экспериментального макета мобильной канатной

### References

1. Patent RU 2337023, B61B 7/00. Mobilnaya podvesnaya kanatnaya doroga [Mobile ropeway]. Korotkiy A.A., Khalphin M.N., Maslov V.B. Published 27.10.2008. (In Russian)

2. Patent RU 2465423, E04H 3/14. Stadion [Stadium]. Korotkiy A.A., Prihodko V.M., Kustarev G.V. Published 27.10.2012. (In Russian)

3. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P. General stability of a base vehicle of a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 210-220. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220 (In Russian)

4. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P., Ignatov D.A. The experimental model creation of a mobile ropeway by 3D-printing. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 221-230. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230 (In Russian)

5. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Sovremennaya teoriya manipulatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselevykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov. Kon-*

дороги с использованием 3D-печати // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 221-230. – DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230>.

5. Лагереv И.А., Лагереv 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>.

6. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Бословяк П.В. Проектирование и исследования конвейеров с подвесной грузонесущей лентой. Брянск: РИО БГУ, 2016. 303 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1197308>.

7. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Гончаров К.А. Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров. Брянск: РИО БГУ, 2017. 384 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1196612>.

8. Таричко В.И., Лагереv И.А. Комплексная математическая модель для исследования рабочих процессов мобильных канатных дорог // Сборник материалов XII Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 770-774.

9. Вершинский А.В., Лагереv И.А., Шубин А.Н., Лагереv А.В. Расчет металлических конструкций подъемно-транспортных машин методом конечных элементов. Брянск: РИО БГУ, 2015. 210 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202240>

10. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Говоров В.В. Модернизация крана-манипулятора самоходной энергетической машины АСТ-4-А // Вестник Брянского государственного технического университета. 2010. №4. С. 59-66. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1301306>

11. Лагереv И.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №4. С. 29-36.

12. Лагереv И.А. Динамическая нагрузка

*struktziya 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 Russian)

6. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. Proektirovanie i issledovanie konveyerov s podvesnoy gruzonesushey lentoy [Design and research of conveyors with suspended load-bearing belt]. Bryansk, RIO BGU, 2016. 303 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1197308> (In Russian)

7. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. Modelirovanie rabochikh protsessov i proektirovanie mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov [Simulation of working processes and design of multi-drive belt conveyors]. Bryansk, RIO BGU, 2017. 384 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1196612> (In Russian)

8. Tarichko V.I. *Kompleksnaya matematicheskaya model' dlya issledovaniya rabochikh protsessov mobilnykh kanatnykh dorog* [Comprehensive model of the mobile ropeway]. Moscow, MSTU im. N.E. Bauman, 2019, pp. 770-774.

9. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Raschet metallicheskiikh konstruktсий pod'yemno-transportnykh mashin metodom konechnykh elementov* [Calculation of metal constructions of lifting-transport machines by finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 210 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202240>

10. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Govorov V.V. Crane-manipulator of mobile energy unit AST-4-a modernization, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, No.4, pp. 22-31. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1301306>

11. Lagerev I.A. Simulation of stress-strain state in crane-manipulator of pipeline welding machine. *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2011, No.4, pp. 29-36. (In Russian)

12. Lagerev I.A. Trunk pipeline welding machine crane-manipulator dynamics during

женность крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов при движении с грузом // Подъемно-транспортное дело. 2011. №3. С. 7-10.

13. Лагереv И.А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Брянск: РИО БГУ, 2016. 371 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1198980>

14. Фадин А.М., Иванов А.М., Шадрин С.С. Методика оценки алгоритмов управления автомобилем в автоматическом режиме // Вестник МАДИ. 2013. Вып. 3. С. 3-7.

15. Брауде В.И., Тер-Мхитаров М.С. Системные методы расчета грузоподъемных машин. Л.: Машиностроение, 1985. 181 с.

16. Шадрин С.С. Иванов А.М. Идентификация параметров сопротивления движению колесных транспортных средств в эксплуатации // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т.1. №2. С. 248-251.

17. Чудаков О.И., Горелов В.А., Падалькин Б.В. Математическая модель прямолинейного движения по деформируемой опорной поверхности двухзвенного сидельного автопоезда с активным полуприцепным звеном // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. №2. С. 121-138.

18. Лагереv И.А. Комплексная математическая модель манипуляционной системы мобильной транспортно-технологической машины // Мир транспорта. 2017. Т. 15. №1. С. 28-39.

19. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимальное проектирование линии канатного метро // Вестник Брянского государственного университета. 2015. №2. С. 406-415. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241>

20. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2015. Т.1. № 1. С. 57-65.

21. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Короткий А.А., Панфилов А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» // Вестник

freight movement. *Podemno-transportnoe delo*, 2011, No.3, pp. 7-10. (In Russian)

13. Lagerev I.A. Modelirovanie rabochikh protsessov manipulyatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselovykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov [Modeling of work processes in manipulation systems for mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes]. Bryansk, RIO BGU, 2016. 371 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1198980> (In Russian)

14. Fadin A.M., Ivanov A.M., Shadrin S.S. Technique of the assessment of algorithms of management of the car in the automatic mode. *Vestnik MADI*, 2013, Iss 3, pp. 3-7. (In Russian)

15. Braude V.I., Ter-Mhitarov M.S. *Sistemnye metody rascheta gruzopod'emnykh mashin* [System methods of calculation of load-lifting machines]. Leningrad, Mashinostroenie, 1985, 181 p.

16. Shadrin S.S., Ivanov A.M. Identification of parameters of the resistance movement of wheeled vehicles during operation. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2013, Vol.1, No.2, pp. 248-251. (In Russian)

17. Tchudakov O.I., Gorelov V.A. Padalkin B.V. Mathematical Model of Linear Motion on the Deformable Supporting Surface of the Two-Link Road Train with an Active Semitrailer. *Vestnik MGTU Im. N.E. Baumana*, 2017, No.2, pp. 121-138. (In Russian)

18. Lagerev I.A. Complex mathematical model of the manipulation system of a mobile transport-technological machine. *Mir transporta*, 2017, Vol. 15, No.1, pp. 28-39. (In Russian)

19. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of the cable car line. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 406-415. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241> (In Russian)

20. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of cable subway lines in a highly urbanized city environment. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2015, Vol.1, No.1, pp. 57-65. (In Russian)

21. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Innovation transport system "Bryansk rope metro". *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 3, pp. 12-15. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>

Брянского государственного технического †  
университета. 2012. №3. С. 12-15. DOI: †  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025> †