

УДК (UDC) 629.1-44

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫMOTION MODES SIMULATION
OF A MOBILE TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINEТаричко В.И.¹, Лагереv И.А.², Черных А.А.²
Tarichko V.I.¹, Lagerev I.A.², Chernykh A.A.²¹ – АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)² – Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)¹ – Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)² – Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. Величины действующих внешних нагрузок и воздействий на мобильную машину зависят от текущего режима движения и его параметров. В статье представлены подходы к имитационному моделированию режимов движения мобильной транспортно-технологической машины. Моделирование включает два этапа. На первом этапе с помощью имитационной модели определяются параметры режимов движения (порядок чередования различных режимов движения, скорости машины, продолжительность режимов). На втором этапе с помощью математической модели динамики исследуются рабочие процессы мобильной транспортно-технологической машины. Результаты моделирования представляют собой совокупность значений параметров движения, а также реализации процесса динамической нагруженности.

Ключевые слова: колесное шасси, грузовой автомобиль, режим движения, факторы нагруженности, имитационное моделирование.

Дата принятия к публикации: 11.12.2019
Дата публикации: 25.03.2020

Сведения об авторах:

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

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

ORCID: 0000-0002-0921-6831.

Черных Александр Андреевич – студент ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: ekzunt@mail.ru.

Abstract. The magnitude of the external loads and impacts on the mobile transport and technological machine depend on the current motion mode and its parameters. The article presents approaches to the simulation modeling of the motion modes of a mobile transport and technological machine. Modeling involves two stages. In the first stage, using simulation model are determined by parameters of the motion (a rotation of different modes of movement, machine speed, the duration of modes). In the second – with the help of mathematical model of dynamics examines the workflows of mobile transport technological machine. The results of the simulation are a set of values of the motion parameters, as well as the implementation of the dynamic loading process.

Keywords: wheeled chassis, truck, motion mode, load factors, simulation.

Date of acceptance for publication: 11.12.2019
Date of publication: 25.03.2020

Authors' information:

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

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

Alexandr A. Chernykh – Student, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: ekzunt@mail.ru.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8

Acknowledgements

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8

1. Введение

Имитационное моделирование факторов нагруженности является эффективным инструментом оценки внешних нагрузок и воздействий на технический объект [1, 2].

Имитационное моделирование может применяться для тестирования систем диагностики технического объекта, в том числе, с использованием технологий искусственного интеллекта. В этом случае имитационная модель объекта диагностики выступает в качестве его цифрового аналога и используется для выполнения моделирования нормальных рабочих процессов. Результаты имитационного моделирования используются для создания обучающей выборки для системы диагностики (нейросети). Искусственное искажение диагностических параметров позволяет смоделировать внештатные ситуации, что должно вызывать соответствующую реакцию системы диагностики [3, 4].

2. Алгоритм имитационного моделирования объекта исследования

Имитационное моделирование режимов движения мобильной транспортно-технологической машины выполняется с помощью разработанного программного модуля по следующему алгоритму.

На первом этапе методом статистических испытаний определяется последовательность чередования основных режимов движения мобильной транспортно-технологической машины. В работе рассматриваются следующие режимы – стоянка, разгон, движение с постоянной скоростью, притормаживание, полное служебное и экстренное торможение.

На втором этапе с использованием математической модели динамики мобильной транспортно-технологической машины для каждого режима движения проводится интегрирование уравнений движения, что по-

зволяет определить значения координаты x , скорости $\dot{x}$ и ускорения $\ddot{x}$ машины в любой момент модельного времени.

На третьем этапе в зависимости от значений x , $\dot{x}$ и $\ddot{x}$ вычисляются другие параметры мобильной транспортно-технологической машины. Для этого могут использоваться как детерминированные модели, так и метод статистических испытаний.

3. Моделирование последовательности режимов движения

При нормальном движении наблюдается постоянное чередование режимов движения мобильной транспортно-технологической машины. Рассмотрим режимы движения более подробно.

Стоянка (режим 0) – режим движения, при котором $x = const$, $\dot{x} = 0$, т.е. координата мобильной машины не изменяется, а скорость нулевая. Моделирование всегда начинается и заканчивается этим режимом.

Разгон (режим 1) – режим движения, при котором $\ddot{x} > 0$, т.е. происходит увеличение скорости мобильной машины от значения v_1 до значения v_2 ($v_2 > v_1$).

Движение МТТМ с постоянной скоростью (режим 2) – режим движения, при котором $\dot{x} = const$, $\ddot{x} = 0$.

Притормаживание (режим 3), полное служебное торможение (режим 4) и аварийное торможение (режим 5) являются частными случаями торможения мобильной машины, при всех этих режимах $\ddot{x} < 0$, т.е. происходит снижение ее скорости от значения v_1 до значения v_2 ($v_2 < v_1$).

При притормаживании мобильной машины скорость снижается, однако $v_2 \neq 0$. При полном служебном торможении $v_2 = 0$. При этом торможение производится с номинальным тормозным усилием R_{br} .

Для моделирования динамики мобильной транспортно-технологической машины необходимо смоделировать последовательность чередования режимов движения и их параметры методом статистических испытаний (метод Монте-Карло) [1, 2].

Общее количество смен режимов равно N_{reg} . Каждый конкретный режим движения в последовательности имеет номер j , при этом $j = 1 \dots N_{reg}$.

В дальнейшем, для удобства будем использовать не только названия режимов движения, но их цифровое обозначения. Например, вместо названия «движение с посто-

янной скоростью» будем использовать термин «режим 2» или индекс $m_{rea,i} = 2$.

Метод статистических испытаний заключается в определении на основании статистических исходных данных:

- вида режима движения, которым сменится текущий режим движения (например, после разгона будет торможение или движение с постоянной скоростью);
- новой скорости автомобиля (например, при торможении скорость снизится до 32 км/ч или 45 км/ч);
- продолжительности по времени стоянки или движения с постоянной скоростью.

Для наглядности рассмотрим процесс чередования режимов движения (рис. 1).

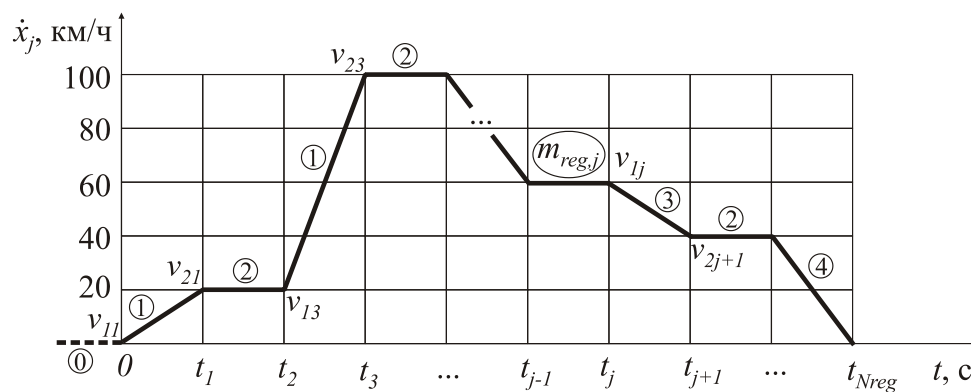


Рис. 1. Процесс чередования режимов движения

Тип режима движения, задаваемый индексом $m_{reg,j} = 1 \dots 5$, определяется методом статистических испытаний. На рис. 1 индекс $m_{reg,j}$ для каждого режима движения изображен в круге. При моделировании следует учитывать дополнительные условия. После режимов 1 и 3 обязательно следует режим 2. После режимов 4 и 5 обязательно следует режим 0. После режима 0 обязательно следует режим 1.

Для режимов движения 1 и 3 необходимо методом статистических испытаний смоделировать значение новой скорости движения v_{2j} . Для остальных режимов оно определяется автоматически. Режимы 4 и 5 подразумевают полную остановку, т.е. $v_{2j}=0$. Очевидно, что в режиме 0 $v_{2j}=0$.

Каждый режим движения длится от момента времени t_{j-1} до момента времени t_j . Для режимов движения 0 и 2 значение t_j моделируется методом статистических испытаний. Для режимов движения 1, 3, 4, 5 длительность определяется автоматически в ходе интегрирования уравнений движения, т.е. режим движения заканчивается, когда скорость движения достигает заданной величины.

Рассмотрим процесс чередования режимов движения (рис. 1). Так как в начале моделирования мобильная транспортно-технологическая машина стоит ($m_{reg0}=0$), то согласно принятым дополнительным условиям при $j=1$ режим движения $m_{reg1}=1$, а при $j=2$ режим движения $m_{reg2}=2$. При $j=1$ скорость движения со значения v_{11} увеличива-

ется до значения v_{21} . При $j=3$ методом статистических испытаний был определен режим движения $m_{reg3}=1$, когда скорость растет от значения v_{13} до значения v_{23} . Поэтому при $j=4$ обязательно $m_{reg4}=2$. Режим движения $m_{reg,j}=2$. Далее методом статистических испытаний определено, что $m_{reg,j+1}=3$. Скорость движения падает со значения v_{1j} до значения v_{2j+1} . После следует режим 2. При $j=N_{reg}$ методом статистических испытаний определено, что происходит полное служебное торможение $m_{regN_{reg}}=4$.

Вычисление значений случайных величин методом статистических испытаний проводится следующим образом. Пусть x – случайная величина, $f(x)$ и $F(x)$ – плотность и функция распределения случайной величины x .

Смоделировать методом статистических испытаний случайную величину означает получить последовательность ее значений, распределенных по заданным законам. В основе моделирования лежит получение равномерно распределенных случайных чисел x_R [1, 2]. В основе построения искомой последовательности значений случайной величины x лежит следующее соотношение [1, 2]:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = x_R.$$

Решение данного уравнения имеет вид:

$$x = F^{-1}(x_R),$$

где F^{-1} – обратная функция для F [1, 2].

В работе исходные статистические данные представляются в виде блоков распределения случайных величин. Блок распределения (рис. 2, а) строится следующим образом. Весь диапазон изменения случайной величины $0 \dots Q_H$ делится на равные отрезки (их количество равно K). Эти отрезки называются ступенями блока. Каждой k -й ступени ($k=1 \dots K$) соответствует максимальное значение Q_k и вероятность ее появления μ_k (частота ступени блока) [1, 2].

Блок распределения на рис. 2,б имеет 4 ступени. Первая и вторая ступень имеют частоту 0,125, третья – 0,25, четвертая – 0,5.

В ходе моделирования методом статистических испытаний значения случайных величин также вычисляются с помощью генератора случайных чисел (рис. 2, б).

Сгенерированное число x_R ставится в соответствие с точкой на линии $\mu_k / \sum \mu_k$. Например, на рис. 2, б показано $x_R = 0,63$. Это соответствует 4-й ступени блока. Таким образом, в данном вычислительном опыте значение моделируемого параметра принимается равным значению 4-й ступени, т.е. $0,25Q_H$.

Существуют уточненные алгоритмы моделирования случайного распределения факторов нагруженности мобильных машин, позволяющие на основании ступенчатого блока и генератора случайных чисел моделировать континуальные распределения значений. Для повышения точности моделирования рекомендуется пересчитывать частоты распределения ступеней блока после каждого вычислительного эксперимента [1].

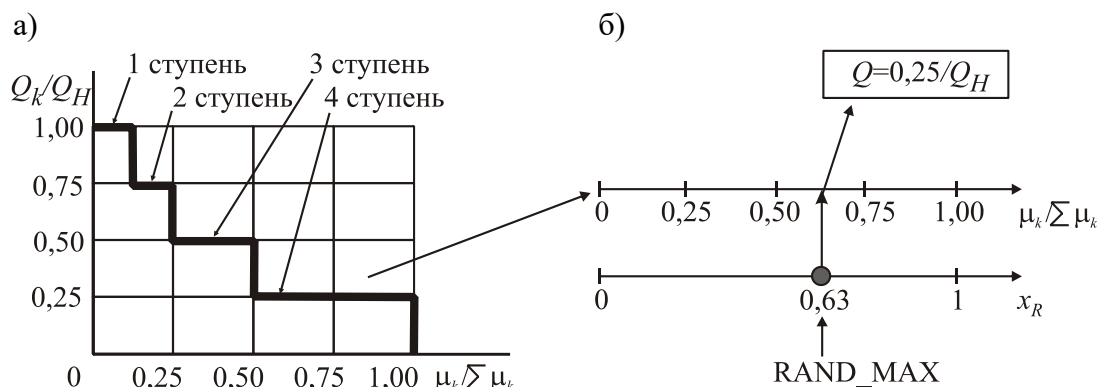


Рис. 2. Метод статистических испытаний при использовании блоков распределения:
а – блок распределения; б – генерация значения случайно величины

Для проверки работоспособности алгоритма выполнено имитационное моделирование режимов движения базового шасси мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса [5]. Для выполнения имитационного моделирования мобильного канатного комплекса были использованы следующие исходные данные, представленные в виде блоков распределения параметров.

Если разгон происходит сразу после стоянки, то методом статистических испытаний определяется скорость движения v_{2j} , до которой выполняется разгон согласно следующему блоку распределения (табл. 1).

Таблица 1

Вероятность разгона до заданной скорости после стоянки

Скорость v_{2j} , км/ч	Вероятность
0...20	0,05
20...40	0,50
40...60	0,25
60...80	0,15
80...100	0,05

Если происходило движение с постоянной скоростью (режим 2), то методом статистических испытаний определяется, какой режим движения последует за движением с постоянной скоростью, согласно табл. 2.

Таблица 2

Вероятность следования режима за движением с постоянной скоростью

Тип режима, следующего за движением с постоянной скоростью	Вероятность
Разгон (режим 1)	0,40
Притормаживание (режим 3)	0,45
Полное служебное торможение (режим 4)	0,1499
Аварийное торможение (режим 5)	0,0001

Если происходит притормаживание (режим 3), то необходимо определить, на сколько упадет скорость движения. Для удобства определяем это согласно табл. 3 не в

абсолютных, а в относительных единицах. При этом $v_{2j} = k_{br} v_{1j}$.

Таблица 3

Вероятность притормаживания до заданной скорости

Коэффициент k_{br}	Вероятность
0,9	0,05
0,8	0,05
0,7	0,10
0,6	0,15
0,5	0,30
0,4	0,15
0,3	0,10
0,2	0,05
0,1	0,05

Если происходит разгон (режим 1), то необходимо определить, на сколько увеличится скорость движения после разгона. Для удобства определяем это согласно табл. 4 не в абсолютных, а в относительных единицах.

При этом $v_{2j} = k_{br} v_{1j}$. Блок (табл. 4) используется только после движения с постоянной скоростью. При определении скорости разгона сразу после стоянки используется другой блок (табл. 1).

Таблица 4

Вероятность разгона до заданной скорости

Коэффициент k_{br}	Вероятность
1,05	0,05
1,1	0,05
1,15	0,10
1,2	0,15
1,25	0,30
1,3	0,15
1,35	0,10
1,4	0,05
1,45	0,05

Продолжительность стоянки (режим 0) или движения с постоянной скоростью (режим 2) определяется на основе блока распределения (табл. 5).

Таблица 5

Вероятность продолжительности стоянки
или движения с постоянной скоростью

Промежуток $t_j - t_{j-1}$, с	Вероятность
0...60	0,50
61...120	0,20
121...180	0,15
181...240	0,10
241...300	0,05

Данные блоки распределения получены на основе анализа результатов экспериментальных гистограмм пробега базового шасси мобильного транспортно-технологического канатного комплекса. Они будут уточняться в ходе дальнейших исследований.

Пример результатов имитационного моделирования режимов движения мобильного канатного комплекса и их параметров приведены на рис. 3.

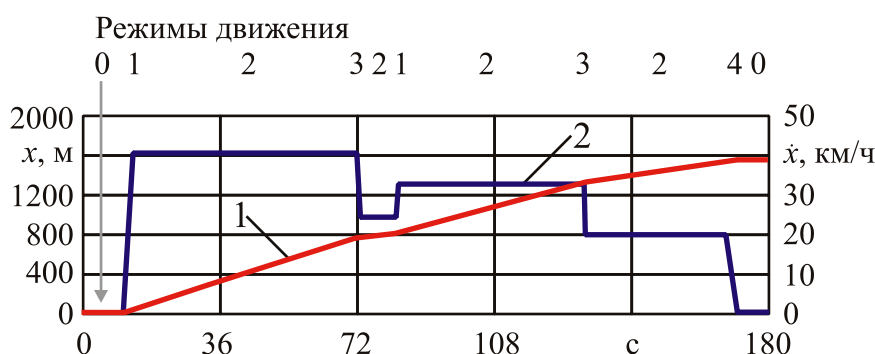


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования режимов движения базового шасси МТПКК: 1 – координата МТПКК на трассе; 2 – скорость движения

4. Моделирование динамики мобильного канатного комплекса с учетом результатов моделирования режимов движения

Для моделирования динамической нагруженности мобильной машины с учетом установленной последовательности режимов движения используются математические модели. Для исследуемого мобильного транспортно-технологического канатного комплекса рекомендуется использовать комплексную математическую модель, учитывающую взаимодействие всех его подсистем [6].

Структура комплексной математической модели выглядит 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 момен-

тов 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: $F_i = F(\{x\}, \{\dot{x}\}, \{\ddot{x}\})$ [6-8].

Продолжительность режима разгона или торможения определяется в процессе численного интегрирования уравнений движения, входящих в комплексную математическую модель.

Пример моделирования характеристик нагруженности базовой станции мобильного транспортно-технологического канатного комплекса приведен на рис. 4. Исходные параметры модели приведены в работе [6].

5. Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что имитационное моделирование позволяет прогнозировать характеристики нагруженности элементов

мобильного транспортно-технологического канатного комплекса. Использование при этом результатов моделирования режимов движения мобильной машины позволяет не только определить параметры законов изменения характеристик нагруженности (например, построить блоки циклических напряжений в опасных сечениях конструкции), но и оценить историю нагружения

(процессы чередования высоких и низких значений амплитуд колебаний), что особенно важно при оценке живучести.

Рекомендуется применять предложенный подход при оценке нагруженности на этапе проектирования инновационных образцов мобильных транспортно-технологических канатных комплексов.

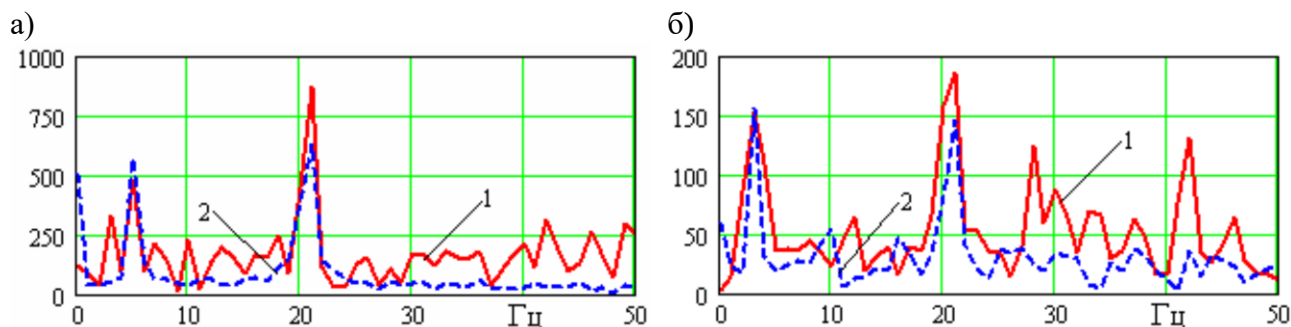


Рис. 4. Спектральные плотности динамических нагрузок в элементах базовой станции мобильного канатного комплекса: а – в задней подвеске; б – в районе кресла водителя (1 – движение по грунтовой дороге; 2 – движение по асфальтобетонному покрытию)

Список литературы

1. Лагереv И.А. Имитационное моделирование факторов нагруженности металлоконструкции мостового крана // Вестник Брянского государственного технического университета. 2009. №4(24). С. 65-70.
2. Лагереv И.А. Моделирование факторов нагруженности металлоконструкции мостового крана на основе сетевой имитационной модели // Вестник Брянского государственного технического университета. 2010. №2(26). С. 74-81.
3. Куликов Г.Б. Методика диагностики технического состояния механических систем привода полиграфического оборудования с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2008. №4(73). С. 90-112.
4. Пашков А.А., Чернавина Т.В. Исследование возможности диагностики двигателя внутреннего сгорания автомобиля с применением нейронной сети // Инновационные направления развития в образовании, экономике, технике и технологиях: сборник статей.

References

1. Lagerev I.A. Simulation modeling of loading factors of bridge crane metal structure. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, No. 4(24), pp. 65-70. (In Russian)
2. Lagerev I.A. Modeling of loading factors of bridge crane metal structure on the basis of network simulation model. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, No. 2(26), pp. 74-81. (In Russian)
3. Kulikov G.B. Technique of Diagnostics of Technical Status of Mechanical Systems of Polygraphic Equipment Drive Using Artificial Neuron Networks. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.Eh. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye*, 2008, No.4(73), pp 90-112. (In Russian)
4. Pashkov A.A., Tchernavina T.V. Research of possibility of diagnostics of the internal combustion engine of the car with application of a neural network. In: *Innovatsionnye napravleniya razvitiya v obrazovanii, ekonomike, tekhnike i tekhnologiyakh*. Stavropol, DGTU, 2016, pp. 136-139. (In Russian)

Ставрополь: ДГТУ, 2016. С. 136-139.

5. Лагереv А.В., Таричко В.И., Солдatchенков 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>.

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

7. 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>.

8. 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>.

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

6. Tarichko V.I., Khimich A.V. Comprehensive model of the mobile transport and overloading ropes complex. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 210-220. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220 (In Russian)

7. 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)

8. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. *Modelirovanie raboichikh 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)