

УДК (UDC) 629.113

ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ
МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ ШАССИTIME CHANGE PROCESS IN MECHANICAL TRANSMISSION RELIABILITY OF
MULTI-AXLE WHEELED VEHICLESТаричко В.И.¹, Лагереv А.В.², Мазлумян Г.С.¹
Tarichko V.I.¹, Lagerev A.V.², Mazlumyan G.S.¹¹ – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Россия)² – Российский университет транспорта (Москва, Россия)¹ – Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (Moscow, Russian Federation)² – Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Многоосные колесные шасси находят широкое применение для решения различных транспортно-логистических задач на территориях со сложным рельефом, неблагоприятными почвенными условиями, наличием природных препятствий и отсутствием минимально необходимой транспортной инфраструктуры. Объектом исследования является механическая трансмиссия многоосного колесного шасси с несколькими ведущими и ведомыми мостами. Цель исследования заключается в создании инженерной методики прогнозирования кинетики (изменения во времени или в зависимости от пробега) количественных показателей надежности трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем в течение всего нормативного срока эксплуатации шасси. Методика базируется на разработанной вероятностной математической модели. Она позволяет прогнозировать кинетику показателей надежности как механической трансмиссии в целом, так и ее подсистем с учетом сроков и объемов проведения ремонтно-восстановительных работ. Расчет вероятностей нахождения трансмиссии и ее подсистем в произвольный момент времени в исправном состоянии основан на решении системы линейных дифференциальных уравнений Чепмена-Колмогорова. Предусмотрено периодическое реформирование системы уравнений в моменты времени проведения плановых ремонтов шасси. Представлены результаты тестового расчета применительно к механической трансмиссии 6-осного колесного шасси с колесной формулой 12х10.

Ключевые слова: многоосное шасси, трансмиссия, кинетика надежности, исправное состояние, отказ

Дата получения статьи: 01.03.2025
Дата принятия к публикации: 15.04.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Таричко Вадим Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные установки», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», e-mail: 32.6909@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0286-725X>

Abstract. Multi-axle wheeled chassis are widely used to solve various transport and logistics tasks in areas with difficult terrain, unfavorable soil conditions, the presence of natural obstacles and the lack of minimum necessary transport infrastructure. The object of the study is a mechanical transmission of a multiaxial wheeled chassis with several drive and non-driving axles. The purpose of the study is to create an engineering methodology for predicting the kinetics (changes over time or depending on mileage) of quantitative indicators of the reliability of the transmission as a whole and its key subsystems during the entire service life of the chassis. The methodology is based on the developed probabilistic mathematical model. It allows you to predict the kinetics of reliability indicators of both the mechanical transmission as a whole and its subsystems, taking into account the timing and volume of repair and restoration work. The calculation of the probabilities of finding the transmission and its subsystems in good condition at any given time is based on solving the Chapman-Kolmogorov system of linear differential equations. Periodic reformulation of this system of equations is provided at the time of scheduled repairs of the wheeled chassis. The results of a test calculation example and their analysis are presented in relation to the mechanical transmission of a 6-axle wheeled chassis with a 12x10 wheel formula.

Keywords: multi-axle chassis, transmission, reliability kinetics, serviceability, failure.

Date of manuscript reception: 01.03.2025
Date of acceptance for publication: 15.04.2025
Date of publication: 25.09.2025

Authors' information:

Vadim I. Tarichko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Transport installations at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), e-mail: 32.6909@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0286-725X>

Лагереv Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

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

Мазлумян Григорий Сергеевич – доктор технических наук, проректор по научной работе, заведующий каф. «Транспортные установки», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», e-mail: nauka@madi.ru.

Alexander V. Lagerev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department «Ground transportation and technological facilities» at Russian University of Transport, e-mail: bsu-avl@yandex.ru.
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

Grigoriy S. Mazlumyan – Doctor of Technical Sciences, Vice-Rector for Research, Head of Department of the Transport installations at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), e-mail: nauka@madi.ru.

1. Введение

В настоящее время многоосные колесные шасси, у которых большинство или даже все оси являются ведущими осями, находят широкое применение для решения различных транспортно-логистических задач на территориях со сложным рельефом, неблагоприятными почвенными условиями, наличием природных препятствий и отсутствием минимально необходимой транспортной инфраструктуры [1-3].

Одним из основных направлений обеспечения требуемого уровня надежности трансмиссии колесных шасси на стадии их проектирования и производства является совершенствование конструкции, методов расчета и анализа технического состояния, технологических методов повышения индивидуальной надежности ключевых структурных элементов трансмиссии [4, 5]. Для этого широко используются различные виды математического и имитационного моделирования [6, 7], подходы на основе искусственного интеллекта [8], оптимизационные модели [1], цепи Маркова [9], деревья отказов [10], цифровые двойники [11, 12] и др.

Объектом исследования, результаты которого представлены в данной статье, является механическая трансмиссия многоосного колесного шасси с несколькими ведущими и ведомыми мостами. Шасси предназначено для размещения навесного оборудования различного функционального назначения.

Цель исследования является создание инженерной методики прогнозирования кинетики (изменения во времени или в зависимости от пробега) количественных показателей надежности трансмиссии в целом и ее

ключевых подсистем в течение всего нормативного срока эксплуатации шасси.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана методика прогнозирования кинетики (изменения во времени и в зависимости от пробега) количественных показателей надежности трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем в течение срока эксплуатации многоосного колесного шасси;
- проведен тестовый расчет кинетики количественных показателей надежности трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем применительно к 6-осному колесному шасси с колесной формулой 12x10.

2. Трансмиссия многоосного колесного шасси

Как пример, на рис. 1 показана принципиальная кинематическая схема 6-осного колесного шасси с колесной формулой 12x10. Она может рассматриваться как типовая кинематическая схема механической трансмиссии многоосного колесного шасси с несколькими ведущими мостами.

Механическое оборудование трансмиссии многоосного колесного шасси структурно может быть представлено в виде совокупности $N = N_m + N_s + 1$ структурно-функциональных подсистем:

- подсистемы общих элементов трансмиссии;
- отдельных подсистем ведущих мостов (числом N_m);
- отдельных подсистем ведомых мостов (числом N_s).

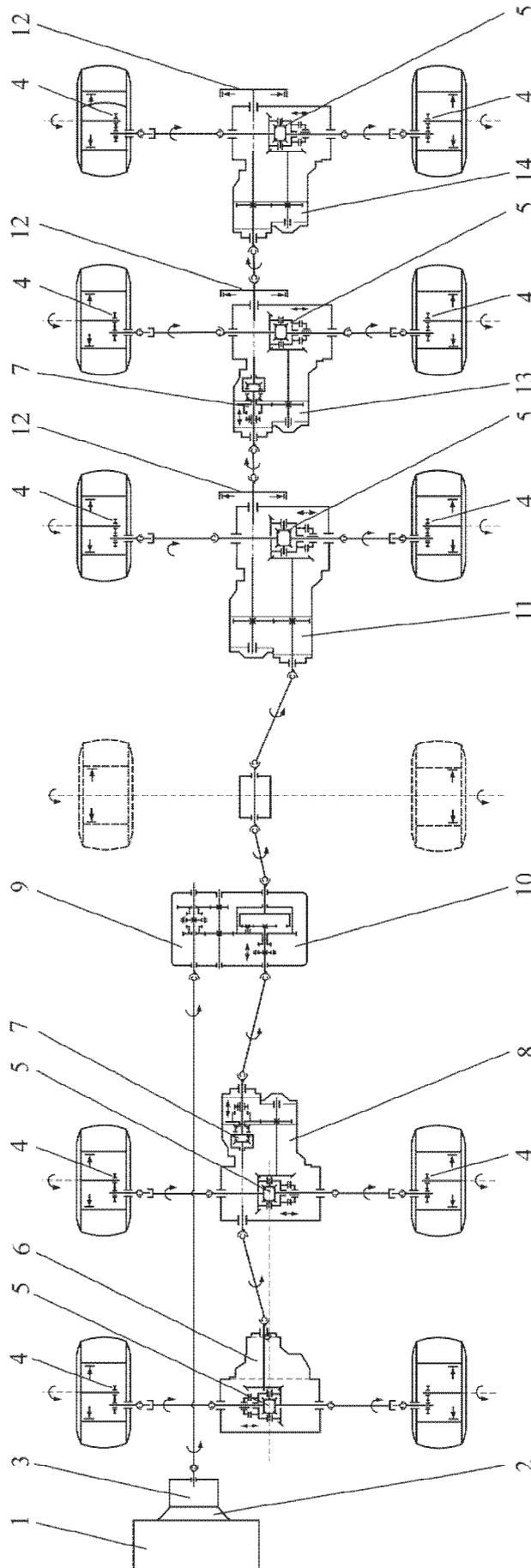


Рис. 1. Кинематическая схема колесного шасси 12х10:

- 1 - двигатель внутреннего сгорания; 2 - сцепление; 3 - механическая коробка переключения передач; 4 - несоосный колесный редуктор; 5 - симметричный межколесный дифференциал; 6 - редуктор первого моста; 7 - симметричный межосевой дифференциал; 8 - редуктор второго моста; 9 - раздаточная коробка; 10 - несимметричный центральный дифференциал; 11 - редуктор четвертого моста; 12 - стояночный тормоз; 13 - редуктор пятого моста; 14 - редуктор шестого моста

На рис. 2 показана общая структурно-функциональная схема трансмиссии многоосного колесного шасси применительно к 6-осному шасси с колесной формулой 12x10 (рис. 1). Схема включает отдельные структурно-функциональные схемы указанных подсистем общим числом $N = 7$. В табл. 1 для этих подсистем приведен перечень структурных элементов, потенциально опасных с точки зрения их возможных отказов и, таким образом, способных оказывать влия-

ние на изменение количественных показателей надежности как отдельных подсистем, так и трансмиссии в целом. В табл. 1 также дана нумерация этих элементов, которая далее используется в расчетных зависимостях математической модели. Общее число подлежащих учету элементов в каждой из подсистем составляет $n_c = 8$, $n_m = 9$ и $n_s = 4$ соответственно, т.е. суммарно $N_e = 21$ структурный элемент.

Таблица 1

Перечень обозначений и нумерация элементов структурных подсистем трансмиссии многоосного колесного шасси

Обозначение	Номер	Описание структурного элемента	Число
<i>Подсистема общих элементов трансмиссии</i>			
С	c_1	Сцепление	1
Кп	c_2	Коробка передач	1
Кр	c_3	Коробка раздаточная	1
Дц	c_4	Дифференциал центральный	1
До	c_5	Дифференциал межосевой	$n_{до}$
Тс	c_6	Тормоз стояночный	$n_{тс}$
Ш	c_7	Шарнир карданный	$n_{ш}$
В	c_8	Вал карданный	$n_{в}$
<i>Подсистема i-го ведущего моста</i>			
Дк _i	$m_{i,1}$	Дифференциал межколесный	1
Рм _i	$m_{i,2}$	Редуктор моста	1
Рк _i	$m_{i,3}$	Редуктор колесный	2
О _i	$m_{i,4}$	Полуось	2
Ш _i	$m_{i,5}$	Шарнир карданный	2
К _i	$m_{i,6}$	Колесо	2
Шс _i	$m_{i,7}$	Шарнир равных угловых скоростей карданный	2
Ф _i	$m_{i,8}$	Соединение фланцевое	2
Тк _i	$m_{i,9}$	Тормоз колесный	2
<i>Подсистема j-го ведомого моста</i>			
Кг _j	$s_{j,1}$	Картер главной передачи	1
Ов _j	$s_{j,2}$	Полуось	2
К _j	$s_{j,3}$	Колесо	2
Тк _j	$s_{j,4}$	Тормоз колесный	2

В процессе своего функционирования трансмиссия колесного шасси может находиться в одном из трех возможных сочетаний состояний:

- 1) исправном и работоспособном состояниях;
- 2) неисправном и работоспособном состояниях;

3) неисправном и неработоспособном состояниях.

Первый случай полностью соответствует штатной работе трансмиссии. Во втором случае ее работа вполне возможна, хотя и требуется предусмотреть проведение необходимых восстановительных операций для тех элементов, у которых произошел некритиче-

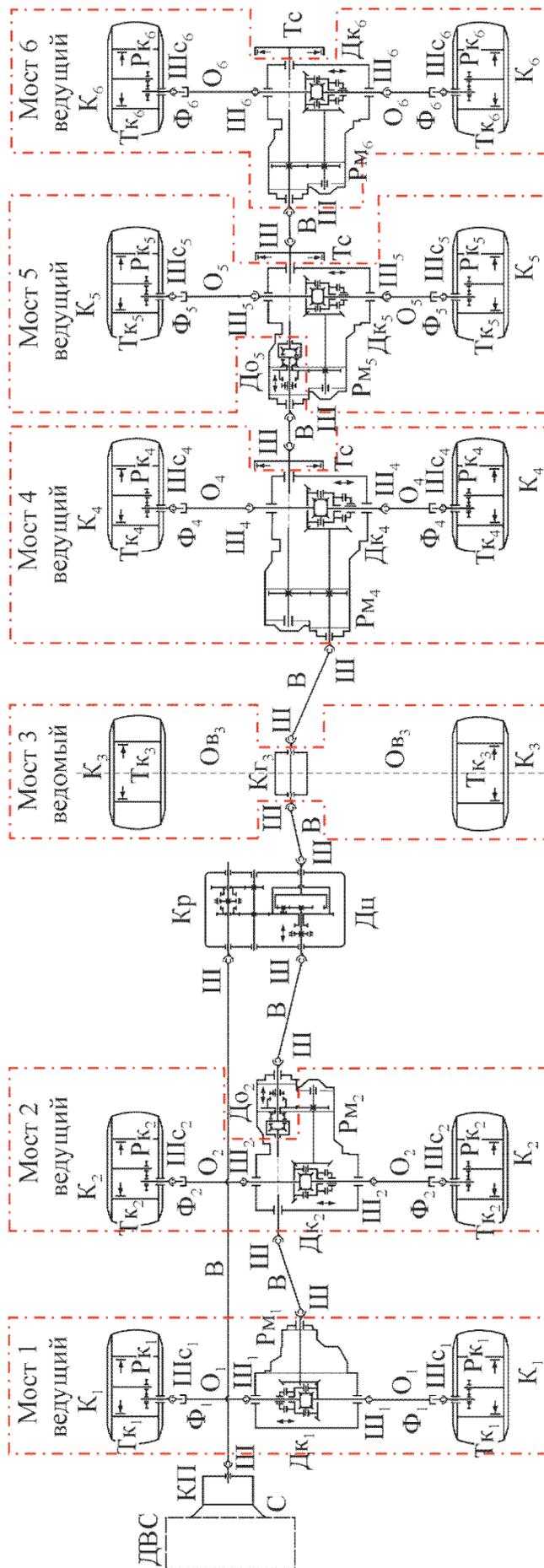


Рис. 2. Структурно-функциональная схема надежности колесного шасси 12x10 для анализа надежности трансмиссии

ский отказ к моменту времени ближайшего планового перерыва в эксплуатации. В третьем случае работа трансмиссии оказывается невозможной и требует немедленной остановки и проведения восстановительных операций, как минимум, для того элемента, у которого произошел критический отказ. Очевидно, количественные показатели надежности, характеризующие переход трансмиссии в третье сочетание возможных состояний, должны быть использованы для оценки технического риска.

3. Математическая модель

При анализе вероятности нахождения рассматриваемой трансмиссии в неисправном состоянии во время эксплуатации многоосного колесного шасси следует учитывать, что в произвольный момент времени она может находиться в одном из следующих возможных состояний:

- одном исправном состоянии S_0 (все структурные элементы в исправном состоянии);
- одном из нескольких неисправных состояний $S_1, S_2, \dots, S_m, \dots, S_{N_e}$ (в каждом состоянии одним m -й элемент находится в неисправном состоянии при исправном состоянии остальных элементов).

В качестве допущения примем, что вероятность наступления последующего отказа произвольного q -го элемента до момента восстановления произошедшего отказа m -го элемента является пренебрежимо малой величиной.

Исходя из данного допущения, на рис. 3 построен граф возможных состояний и связывающих их переходов при эксплуатации трансмиссии в целом. Он представляет собой композицию аналогичных по структуре графов отдельных подсистем. Графы отдельных подсистем приведены на рис. 4. Количественной характеристикой перехода v -й подсистемы из исправного состояния $S_{v,0}$ в неисправное состояние $S_{v,m}$, вызванного отказом m -го элемента, является интенсивность отказов $\lambda_{v,m}$ этого элемента. Количественной характеристикой обратного перехода из неисправного состояния $S_{v,m}$ в исправное состояние $S_{v,0}$, вызванного ремонтом или заменой ранее отказавшего m -го элемента, является интенсивность восстановления $\mu_{v,m}$ этого элемента.

Вероятности $P_0, P_1, \dots, P_m, \dots, P_M$ (для $M = N_e + 1$) нахождения рассматриваемой трансмиссии в произвольный момент времени эксплуатации во всех возможных состояниях $S_0, S_1, \dots, S_m, \dots, S_M$ могут быть определены с помощью уравнения Чепмена-Колмогорова [13, 14]. Для графов на рис. 3 и 4 оно выражается системой обыкновенных дифференциальных уравнений I порядка.

При анализе перехода технического объекта из исправного состояния в неисправное состояние (граф на рис. 3а) система уравнений будет иметь следующий вид:

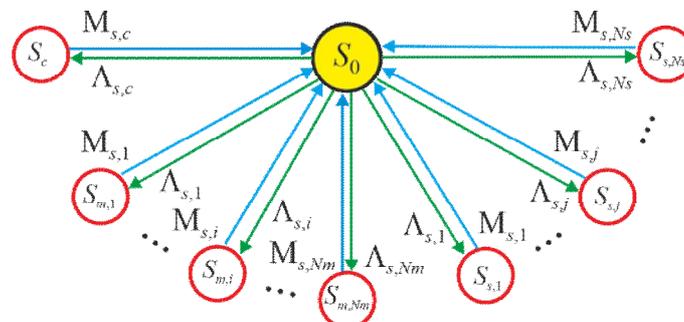


Рис. 3. Граф возможных состояний и переходов между ними при эксплуатации трансмиссии

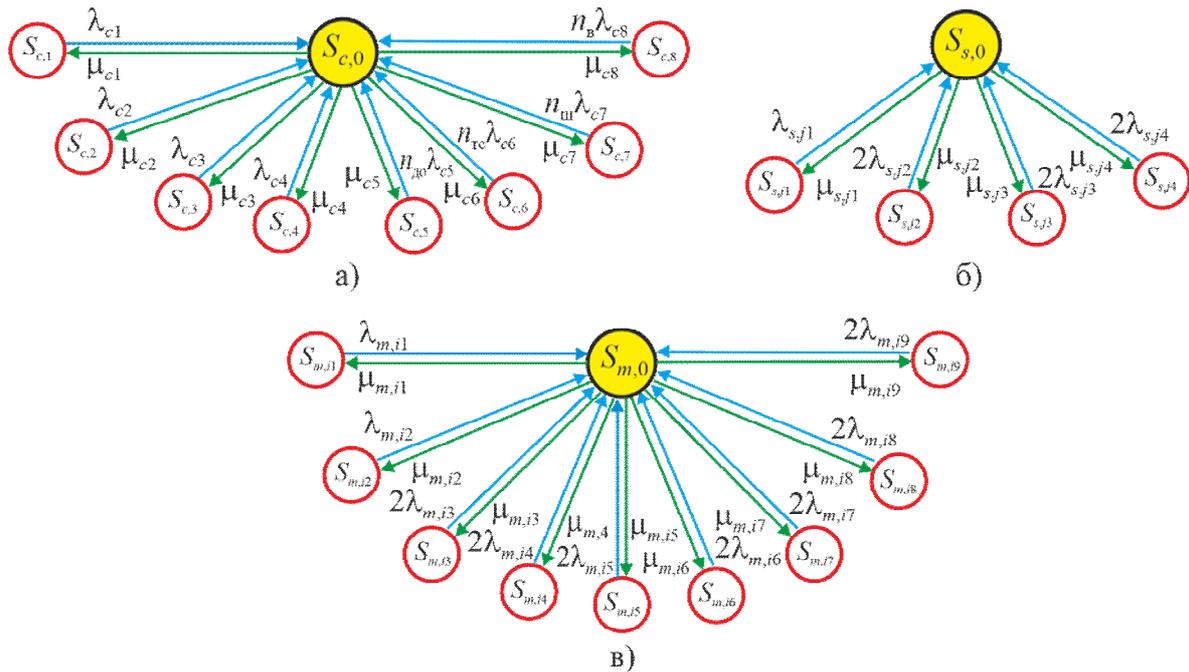


Рис. 4. Графы возможных состояний и переходов между ними при эксплуатации отдельных подсистем трансмиссии: а – подсистема общих элементов трансмиссии; б - подсистема ведомого моста; в - подсистема ведущего моста

$$\begin{Bmatrix} \dot{P}_0 \\ \{\dot{\mathbf{P}}_c\} \\ \{\dot{\mathbf{P}}_M\} \\ \{\dot{\mathbf{P}}_S\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Lambda & \{\omega_{c\mu}\} & \{\omega_{M\mu}\} & \{\omega_{S\mu}\} \\ \{\omega_{c\lambda}\} & [\Omega_{cc}] & [\mathbf{0}]_{cM} & [\mathbf{0}]_{cS} \\ \{\omega_{M\lambda}\} & [\mathbf{0}]^T_{cM} & [\Omega_{MM}] & [\mathbf{0}]_{MS} \\ \{\omega_{S\lambda}\} & [\mathbf{0}]^T_{cS} & [\mathbf{0}]^T_{MS} & [\Omega_{SS}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_0 \\ \{\mathbf{P}_c\} \\ \{\mathbf{P}_M\} \\ \{\mathbf{P}_S\} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где \$P_0\$ - вероятность нахождения трансмиссии в исправном состоянии; \$\{\dots\}^T\$, \$[\dots]^T\$ - операция транспонирования вектора, матри-

цы; \$\Lambda\$ - суммарная интенсивность отказов структурных элементов трансмиссии, определяемая следующими зависимостями:

$$\Lambda = \Lambda_c + \sum_{i=1}^{i=N_m} \Lambda_{mi} + \sum_{j=1}^{j=N_s} \Lambda_{sj};$$

$$\Lambda_c = \lambda_{c1} + \lambda_{c2} + \lambda_{c3} + \lambda_{c4} + n_{ДО} \lambda_{c5} + n_{ТС} \lambda_{c6} + n_{Ш} \lambda_{c7} + n_B \lambda_{c8};$$

$$\Lambda_{mi} = \lambda_{mi,1} + \lambda_{mi,2} + 2(\lambda_{mi,3} + \lambda_{mi,4} + \lambda_{mi,5} + \lambda_{mi,6} + \lambda_{mi,7} + \lambda_{mi,8} + \lambda_{mi,9});$$

$$\Lambda_{sj} = \lambda_{sj,1} + 2(\lambda_{sj,2} + \lambda_{sj,3} + \lambda_{sj,4}).$$

Структура векторов, входящих в (1), определяются следующими зависимостями:

$$\{\mathbf{P}\}^T = \{P_0 \ \{\mathbf{P}_c\} \ \{\mathbf{P}_M\} \ \{\mathbf{P}_S\}\} = \{P_0 \ \{P_{c,1} \ P_{c,2} \ P_{c,3} \ P_{c,4} \ P_{c,5} \ P_{c,6} \ P_{c,7} \ P_{c,8}\} \ \{P_{m,1} \ P_{m,2} \ P_{m,3} \ P_{m,4} \ P_{m,5} \ P_{m,6} \ P_{m,7} \ P_{m,8} \ P_{m,9}\} \ \{P_{s,1} \ P_{s,2} \ P_{s,3} \ P_{s,4}\}\};$$

$$\{\dot{\mathbf{P}}\}^T = \{P_0 \ \{\dot{\mathbf{P}}_c\} \ \{\dot{\mathbf{P}}_M\} \ \{\dot{\mathbf{P}}_S\}\} = \{P_0 \ \{\dot{P}_{c,1} \ \dot{P}_{c,2} \ \dot{P}_{c,3} \ \dot{P}_{c,4} \ \dot{P}_{c,5} \ \dot{P}_{c,6} \ \dot{P}_{c,7} \ \dot{P}_{c,8}\} \ \{\dot{P}_{m,1} \ \dot{P}_{m,2} \ \dot{P}_{m,3} \ \dot{P}_{m,4} \ \dot{P}_{m,5} \ \dot{P}_{m,6} \ \dot{P}_{m,7} \ \dot{P}_{m,8} \ \dot{P}_{m,9}\} \ \{\dot{P}_{s,1} \ \dot{P}_{s,2} \ \dot{P}_{s,3} \ \dot{P}_{s,4}\}\};$$

$$\{\mathbf{P}_c\}^T = \{P_{c,1} \ P_{c,2} \ P_{c,3} \ P_{c,4} \ P_{c,5} \ P_{c,6} \ P_{c,7} \ P_{c,8}\};$$

$$\{\mathbf{P}_{mi}\}^T = \{P_{mi,1} \ P_{mi,2} \ P_{mi,3} \ P_{mi,4} \ P_{mi,5} \ P_{mi,6} \ P_{mi,7} \ P_{mi,8} \ P_{mi,9}\};$$

$$\{\mathbf{P}_{sj}\}^T = \{P_{sj,1} \ P_{sj,2} \ P_{sj,3} \ P_{sj,4}\};$$

$$\{\omega_{c\mu}\} = \{\mu_{c1} \ \mu_{c2} \ \mu_{c3} \ \mu_{c4} \ \mu_{c5} \ \mu_{c6} \ \mu_{c7} \ \mu_{c8}\};$$

$$\begin{aligned} \{\mathbf{w}_{M\mu}\} &= \{\{\mathbf{w}_{m\mu,1}\} \dots \{\mathbf{w}_{m\mu,i}\} \dots \{\mathbf{w}_{m\mu,N_m}\}\}; \\ \{\mathbf{w}_{m\mu,i}\} &= \{\mu_{mi,1} \ \mu_{mi,2} \ \mu_{mi,3} \ \mu_{mi,4} \ \mu_{mi,5} \ \mu_{mi,6} \ \mu_{mi,7} \ \mu_{mi,8} \ \mu_{mi,9}\}; \\ \{\mathbf{w}_{S\mu}\} &= \{\{\mathbf{w}_{s\mu,1}\} \dots \{\mathbf{w}_{s\mu,j}\} \dots \{\mathbf{w}_{s\mu,N_s}\}\}; \\ \{\mathbf{w}_{s\mu,j}\} &= \{\mu_{sj,1} \ \mu_{sj,2} \ \mu_{sj,3} \ \mu_{sj,4}\}; \\ \{\mathbf{w}_{c\lambda}\}^T &= \{\lambda_{c1} \ \lambda_{c2} \ \lambda_{c3} \ \lambda_{c4} \ n_{ДО}\lambda_{c5} \ n_{ТС}\lambda_{c6} \ n_{Ш}\lambda_{c7} \ n_{Б}\lambda_{c8}\}; \\ \{\mathbf{w}_{M\lambda}\}^T &= \{\{\mathbf{w}_{m\lambda,1}\} \dots \{\mathbf{w}_{m\lambda,i}\} \dots \{\mathbf{w}_{m\lambda,N_m}\}\}; \\ \{\mathbf{w}_{m\lambda,i}\}^T &= \{\lambda_{mi,1} \ \lambda_{mi,2} \ 2\lambda_{mi,3} \ 2\lambda_{mi,4} \ 2\lambda_{mi,5} \ 2\lambda_{mi,6} \ 2\lambda_{mi,7} \ 2\lambda_{mi,8} \ 2\lambda_{mi,9}\}; \\ \{\mathbf{w}_{S\lambda}\}^T &= \{\{\mathbf{w}_{s\lambda,1}\} \dots \{\mathbf{w}_{s\lambda,j}\} \dots \{\mathbf{w}_{s\lambda,N_s}\}\}; \\ \{\mathbf{w}_{s\lambda,j}\}^T &= \{\lambda_{sj,1} \ 2\lambda_{sj,2} \ 2\lambda_{sj,3} \ 2\lambda_{sj,4}\}. \end{aligned}$$

Структура матриц, входящих в (1), определяются следующими зависимостями:

- диагональные матрицы:

$$\begin{aligned} \text{diag}[\mathbf{\Omega}_{cc}] &= \{-\mu_{c1} \ -\mu_{c2} \ -\mu_{c3} \ -\mu_{c4} \ -\mu_{c5} \ -\mu_{c6} \ -\mu_{c7} \ -\mu_{c8}\}; \\ \text{diag}[\mathbf{\Omega}_{MM}] &= \{[\mathbf{\Omega}_{mm,1}] \dots [\mathbf{\Omega}_{mm,i}] \dots [\mathbf{\Omega}_{mm,N_m}]\}; \\ \text{diag}[\mathbf{\Omega}_{mm,i}] &= \{-\mu_{mi,1} \ -\mu_{mi,2} \ -\mu_{mi,3} \ -\mu_{mi,4} \ -\mu_{mi,5} \ -\mu_{mi,6} \ -\mu_{mi,7} \ -\mu_{mi,8} \ -\mu_{mi,9}\}; \\ \text{diag}[\mathbf{\Omega}_{SS}] &= \{[\mathbf{\Omega}_{ss,1}] \dots [\mathbf{\Omega}_{ss,j}] \dots [\mathbf{\Omega}_{ss,N_s}]\}; \\ \text{diag}[\mathbf{\Omega}_{ss,j}] &= \{-\mu_{sj,1} \ -\mu_{sj,2} \ -\mu_{sj,3} \ -\mu_{sj,4}\}; \end{aligned}$$

- нулевые матрицы: $[\mathbf{0}]_{cM}$ размером $8 \times 9N_m$, $[\mathbf{0}]_{cS}$ размером $8 \times 4N_s$ и $[\mathbf{0}]_{MS}$ размером $9N_m \times 4N_s$.

Для отдельных подсистем (графы на рис. 4) их переход из исправного состояния в неисправное состояние будет выражаться системами уравнений следующего вида:

- для подсистемы общих элементов трансмиссии

$$\begin{Bmatrix} \dot{P}_{c,0} \\ \dot{\mathbf{P}}_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Lambda_c & \{\mathbf{w}_{c\mu}\} \\ \{\mathbf{w}_{c\lambda}\} & [\mathbf{\Omega}_{cc}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_{c,0} \\ \mathbf{P}_c \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

- для подсистемы i -го ведущего моста

$$\begin{Bmatrix} \dot{P}_{mi,0} \\ \dot{\mathbf{P}}_{mi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Lambda_{mi} & \{\mathbf{w}_{m\mu,i}\} \\ \{\mathbf{w}_{m\lambda,i}\} & [\mathbf{\Omega}_{mm,i}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_{mi,0} \\ \mathbf{P}_{mi} \end{Bmatrix}; \quad (3)$$

- для подсистемы j -го ведомого моста

$$\begin{Bmatrix} \dot{P}_{sj,0} \\ \dot{\mathbf{P}}_{sj} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Lambda_{sj} & \{\mathbf{w}_{s\mu,j}\} \\ \{\mathbf{w}_{s\lambda,j}\} & [\mathbf{\Omega}_{ss,i}] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_{sj,0} \\ \mathbf{P}_{sj} \end{Bmatrix}; \quad (4)$$

где $P_{v,0}$ - вероятность нахождения v -й подсистемы в исправном состоянии.

Начальные условия для решения систем дифференциальных уравнений (1) – (4) включают множество значений вероятностей P_m в момент начала эксплуатации колесного

шасси (в момент начала эксплуатации трансмиссии и ее подсистем) при $\tau = \tau_0 = 0$. Принимая допущение, что в начальный момент времени все структурные элементы всех подсистем трансмиссии находятся в исправном состоянии, можно считать:

$$P_0(\tau = 0) = 1;$$

$$P_{c,0}(\tau = 0) = 1;$$

$$P_{mi,0}(\tau = 0) = 1;$$

$$P_{sj,0}(\tau = 0) = 1.$$

Все остальные элементы векторов начальных условий равны 0.

Системы уравнений (1) - (4) позволяют прогнозировать процесс изменения во времени вероятности исправной работы трансмиссии $P_{rs}(\tau)$ и ее v -й подсистемы $P_v(\tau)$, так как

$$P_{tr}(\tau) = P_0(\tau); \quad P_{tr,c}(\tau) = P_{c,0}(\tau);$$

$$P_{tr,mi}(\tau) = P_{mi,0}(\tau); \quad P_{tr,s}(\tau) = P_{sj,0}(\tau). \quad (5)$$

Решение систем (1) - (4) при начальных условиях позволяет выполнить моделирование графиков $P_{tr}(\tau)$, $P_{tr,c}(\tau)$, $P_{tr,mi}(\tau)$ и $P_{tr,sj}(\tau)$, характеризующих изменение во времени показателей надежности трансмис-

сии в целом и отдельных ее подсистем до момента первого планового ремонта $\tau_{r,1}$.

Проведение ремонтно-восстановительных операций в момент времени $\tau_{r,1}$ резко искажает вид этих графиков, так как в этот момент времени происходит скачкообразное повышение величины показателей надежности вследствие восстановления исходной надежности отремонтированных или замененных элементов. На рис. 5 приведен характерный график изменения во времени вероятности нахождения технического объекта $U_{rs}(\tau)$ и его подсистем в исправном состоянии при проведении периодических ремонтов и при их отсутствии [15], который справедлив и для трансмиссии многоосных специальных колесных шасси.

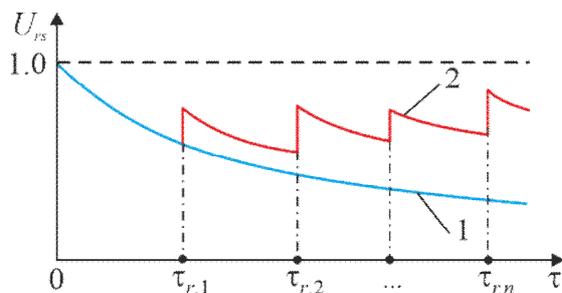


Рис. 5. График изменения во времени вероятности нахождения трансмиссии и ее подсистем в исправном состоянии (1 – без проведения ремонтов; 2 – с проведением ремонтов)

В момент времени $\tau_{r,1}$ производится ремонт одного или нескольких структурных элементов. Поэтому вероятность нахождения m -го элемента v -й подсистемы в неисправном состоянии скачкообразно уменьшаются от $P_{tr,v,m}(\tau_{r,1} - 0) = P_{tr,v,m}(\tau_{r,1})$ до значения $P_{tr,v,m}(\tau_{r,1} + 0) = 0$. Вероятность нахождения трансмиссии и ее подсистем в исправном состоянии скачкообразно увеличивается с $P_{tr}(\tau_{r,1} - 0) = P_{tr}(\tau_{r,1})$ или $P_{tr,v}(\tau_{r,1} - 0) = P_{tr,v}(\tau_{r,1})$ на величину суммы вероятностей $U_{tr,v,m}(\tau_{r,1})$ отремонтированных элементов. С момента $\tau_{r,1}$ интегрирование систем дифференциальных уравнений должно осуществляться при новых векторах начальных условий.

Необходимость ремонта m -го элемента v -й подсистемы во время i -го планового ремонта $\tau_{r,i}$ определяется периодичностью его ремонта или настройки $\Delta T_{v,m}$. Эта периодичность устанавливаемой эксплуатационной документацией.

Полученные таким образом откорректированные векторы $\{\mathbf{P}\}$, $\{\mathbf{P}_c\}$, $\{\mathbf{P}_{mi}\}$ и $\{\mathbf{P}_{sj}\}$ для момента времени окончания первого ремонта $\tau_{r,1}$ являются векторами начальных условий для дальнейшего интегрирования систем уравнений (1) – (4), заменив тем самым векторы начальных условий для момента времени $\tau = 0$.

Аналогично изменяются векторы начальных условий для других моментов времени $\tau_{r,n}$. Таким образом, процесс прогнозирования изменения во времени показателей надежности рассматриваемой трансмиссии и ее подсистем, определяющих их нахождение в исправном или неисправном состоянии, при проведении плановых ремонтных мероприятий элементов после не критического отказа (кривая 2 на рис. 5) сводится к поочередному интегрированию систем уравнений (1) - (4) в пределах последовательно расположенных временных интервалов $\tau_{r,n} \leq \tau \leq \tau_{r,n+1}$. Векторы начальных условий в начальной точке каждого интервала $\tau_{r,n}$ подлежат периодическому перестроению.

4. Компьютерная реализация модели

Разработанная методика моделирования процесса изменения во времени количественных показателей надежности трансмиссии многоосного колесного шасси и его структурных подсистем была реализована в виде компьютерной программы «Надежность_МКШ 1.0». Она позволяет моделировать кинетику показателей надежности трансмиссии, включающей суммарно во всех подсистемах до 200 структурных элементов, со сроком эксплуатации до 150 000 часов. Интегрирование системы дифференциальных уравнений первого порядка Колмогорова-Чепмена (1), являющееся ключевым процессом, а также дополнительных систем

уравнений (2) – (4) выполняется методом Рунге-Кутты IV порядка [16, 17]. Программа имеет библиотеку данных о интенсивности отказов и восстановлений характерных элементов, определяющих надежность трансмиссии многоосных колесных шасси.

Результатом выполнения данной программы является моделирование изменения во времени в течение заданного срока службы многоосного колесного шасси вероятностей нахождения трансмиссии в целом и ее структурных подсистем в исправном состоянии и в возможных состояниях, соответствующих некритическим отказам структурных элементов (с учетом ремонта тех отдельных элементов, которые исчерпали допустимый срок эксплуатации к моменту проведения очередного планового ремонта).

5. Анализ результатов расчета

В качестве примера применения разработанной методики прогнозирования кинетики

(изменения во времени) надежности многоосного колесного шасси в течение срока эксплуатации был выполнен расчет трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем шасси с колесной формулой 12х10 в пределах пробега 100 тыс. км.

Использованные при расчете исходные данные применительно к количественной оценке интенсивности отказов структурных элементов трансмиссии указаны в табл. 2. Количественные значения интенсивности отказов назначены на основании информации, имеющейся с технической литературе [18 - 21]. Указанные количественные значения интенсивности отказов используются в иллюстративных целях. При расчетах надежности трансмиссий конкретных исполнений многоосных колесных шасси необходимо использование уточненных значений интенсивности отказов, соответствующих типоразмерам структурных элементов этих шасси.

Таблица 2

Исходные данные для примера расчета

Обозначение	Номер	Структурный элемент	Интенсивность отказа $\lambda \cdot 10^7, \text{ км}^{-1}$
<i>Подсистема общих элементов трансмиссии</i>			
С	c_1	Сцепление	3,0
Кп	c_2	Коробка передач	0,6
Кр	c_3	Коробка раздаточная	2,0
Дц	c_4	Дифференциал центральный	1,0
До	c_5	Дифференциал межосевой	0,4
Тс	c_6	Тормоз стояночный	0,05
Ш	c_7	Шарнир карданный	0,3
В	c_8	Вал карданный	0,2
<i>Подсистема i-го ведущего моста</i>			
$Дк_i$	$m_{i,1}$	Дифференциал межколесный	0,8
$Рм_i$	$m_{i,2}$	Редуктор моста	2,0
$Рк_i$	$m_{i,3}$	Редуктор колесный	3,0
$О_i$	$m_{i,4}$	Полуось	0,15
$Ш_i$	$m_{i,5}$	Шарнир карданный	0,2
$К_i$	$m_{i,6}$	Колесо	0,1
$Шс_i$	$m_{i,7}$	Шарнир равных угловых скоростей карданный	0,2
Φ_i	$m_{i,8}$	Соединение фланцевое	0,01
$Тк_i$	$m_{i,9}$	Тормоз колесный	0,2

Окончание табл. 2

Обозначение	Номер	Структурный элемент	Интенсивность отказа $\lambda \cdot 10^7, \text{км}^{-1}$
<i>Подсистема j-го ведомого моста</i>			
$K_{Гj}$	$s_{j,1}$	Картер главной передачи	0,1
$O_{Вj}$	$s_{j,2}$	Полуось	0,15
K_j	$s_{j,3}$	Колесо	0,1
$T_{Кj}$	$s_{j,4}$	Тормоз колесный	0,2

На рис. 6 приведен график, характеризующий кинетику (изменение во времени) вероятности исправной работы трансмиссии

в целом. Пробег между ремонтами (техническими обслуживаниями) был принят в размере 10 тыс. км.

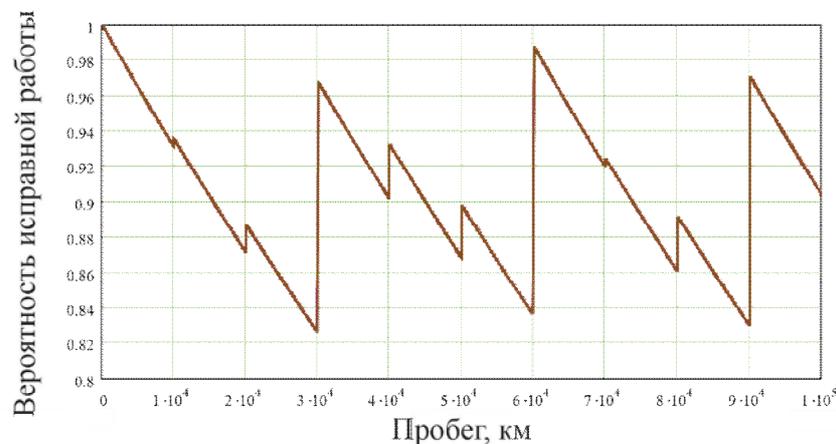


Рис. 6. Изменение вероятности исправной работы трансмиссии многоосного колесного шасси в течение срока эксплуатации

Замена или восстановление конструктивных элементов позволяют периодически повышать вероятность исправной работы трансмиссии многоосного колесного шасси и, таким образом, эффективно противостоять объективной тенденции монотонного снижения его надежности по мере эксплуатации (кривая 1 на рис. 5).

6. Заключение

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

Разработана методика прогнозирования кинетики (изменения во времени и в зависимости от пробега) количественных показателей надежности трансмиссии и ее основных подсистем в течение срока эксплуатации многоосного колесного шасси. Методика позволяет прогнозировать вероятности исправного и неисправного состояния трансмиссии

в целом и ее ключевых подсистем (подсистемы общего оборудования трансмиссии, подсистем ведущих мостов и подсистем ведомых мостов) в произвольный момент времени эксплуатации и после произвольного пробега в течение срока службы многоосных колесных шасси с различным числом ведущих и ведомых осей. Она также учитывает изменение величин вероятности исправного и неисправного состояния трансмиссии в целом и ее ключевых подсистем после проведения ремонтов или технических обслуживаний в назначенные моменты времени или после назначенного пробега.

Приведенный расчет носит иллюстративный характер и позволяет визуально оценить результаты использования разработанной методики. При расчетах надежности трансмиссий конкретных исполнений многоосных колесных шасси необходимо использование уточненных значений интенсивности отка-

зов, соответствующих типоразмерам структурных элементов этих шасси.

Разработанная методика также может быть использована для количественной оценки индивидуальных вкладов конкретных подсистем трансмиссии и ее конкретных структурных элементов в снижение вероятности исправного состояния в зависимости от их индивидуальной надежности (выра-

жаемой величиной интенсивности отказов) и продолжительности между ремонтами (техническими обслуживаниями). Методика также может быть использована для количественной оценки эффективности технических мероприятий, связанных с повышением уровня надежности структурных элементов трансмиссии.

Список литературы

1. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 728 с.
2. 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.
3. Аксенов П.В. Многоосные автомобили. М.: Машиностроение, 1989. 280 с.
4. 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.
5. Веселов Н.Б. Вездеходные транспортно-технологические машины. Конструкции. Конструирование и расчет. Нижний Новгород: РИ «Бегемот», 2010. 320 с.
6. Лагерев И.А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Брянск: РИО БГУ, 2016. 371 с. DOI: 10.5281/zenodo.1198980.
7. Таричко В.И., Лагерев 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
8. Mahale Y., Kolhar S., More A.S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: Technologies, challenges and future research

References

1. Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bolshoy gruzopodernosti* [Wheeled vehicles of extra heavy duty]. Moscow, Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2006. 728 p. (In Russian)
2. Gladov G.I., Vikhrov A.V., Zaytsev S.V., Kuvshinov V.V., Pavlov V.V. *Konstruktzii mnogotselovykh gusenichnykh i kolesnykh mashin* [Designs of multipurpose tracked and wheeled vehicles]. Moscow, Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2010. 400 p. (In Russian)
3. Aksenov P.V. *Mnogoosnye avtomobili* [Multi-axle cars]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 280 p. (In Russian)
4. Bocharov N.F., Tsitovich I.S., Polungyan A.A., Semenov V.M., Tsybin V.S., Zhelglov L.F. *Konstruirovaniye i raschet kolesnykh mashin vysokoy prokhdimosti* [Design and calculation of high-traffic wheeled vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 299 p. (In Russian)
5. Veselov N.B. *Vezdekhodnye transportno-tekhnologicheskie mashiny. Konstruktzii. Konstruirovaniye i raschet* [All-terrain transport and technological vehicles. Constructions. Design and calculation]. Nizhniy Novgorod, RI Begemot, 2010. 320 p. (In Russian)
6. Lagerev I.A. *Modelirovaniye 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: 10.5281/zenodo.1198980 (In Russian)
7. Tarichko V.I., Lagerev I.A., Chernykh

directions // *Discovery Applied Science*. 2025. No. 7. P. 243. DOI: 10.1007/s42452-025-06681-3

9. Nalubowa M., Namango S., Ochola J., Mubiru P.K. Application of Markov chains in manufacturing systems: A review // *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*. 2021. Vol. 3. No.1.

10. Vesely W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F. Fault tree handbook. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981. 209 p.

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

12. Da Silva M.R., de Oliveira L.S., de Bessa I.V. de Carvalho F.A., de Medeiros R.L.P., de Lucena V.F. Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges // *Processes*. 2022. No. 10. P. 744. DOI: 10.3390/pr10040744

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

14. Ross Sh.M. Chapman–Kolmogorov Equations. Introduction to Probability Models. San Diego: Elsevier, 2014. P. 187.

15. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Вероятностно-временной анализ кинетики показателей надежности на стадии проектирования канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2020. №2. С. 256-275. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275.

16. Крылов Н.В., Бобков В.В., Монастырный П.И. Вычислительные методы. Т.2. Москва: Наука, 1977. 400 с.

17. Арушанян О.Б., Залеткин С.Ф. Решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений методами Рунге–Кутты. Москва: МГУ, 2014. 58 с.

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

8. Mahale Y., Kolhar S., More A.S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: Technologies, challenges and future research directions. *Discovery Applied Science*, 2025, No. 7, pp. 243. DOI: 10.1007/s42452-025-06681-3

9. Nalubowa M., Namango S., Ochola J., Mubiru P.K. Application of Markov chains in manufacturing systems: A review. *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*, 2021, Vol. 3, No.1.

10. Vesely W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F. Fault tree handbook. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981. 209 p.

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

12. Da Silva M.R., de Oliveira L.S., de Bessa I.V. de Carvalho F.A., de Medeiros R.L.P., de Lucena V.F. Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges. *Processes*, 2022, No. 10, pp. 744. DOI: 10.3390/pr10040744

13. 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)

14. Ross Sh.M. Chapman–Kolmogorov Equations. Introduction to Probability Models. San Diego: Elsevier, 2014. P. 187.

15. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Probability-temporal analysis of reliability indicators kinetics at the stage of designing a rope system of a mobile transport and reload-

15. Интенсивность отказов элементов: справочник [Электронный ресурс]. – URL: <https://areliability.com/intensivnost-otkazov-elementov-spravochnik/> (дата обращения 25.08.2025).
19. Denson W., Chandler G., Crowell W., Wanner R. Nonelectronic Parts Reliability Data. Chicago: IIT Research Institute, 1991. 632 p.
20. Electronic Reliability Design Handbook (MIL-HDBK-338B). New York: Air Force Research Laboratory Information, 1999. 1046 p.
21. Dhillon B.S. Engineering maintenance: a modern approach. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. 222 p.
- ing ropeway. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 256-275. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275 (In Russian)
16. Krylov N.V., Bobkov V.V., Monastyrnyy P.I. *Vychislitelnye metody. T.2* [Computational methods. Vol. 2]. Moscow, Nauka, 1977. 400 p. (In Russian)
17. Arushanyan O.B., Zaletkin S.F. *Reshenie sistem obyknovennykh differentsialnykh uravneniy metodami Runge–Kutta* [Solving systems of ordinary differential equations by Runge–Kutta methods]. Moscow, MGU, 2014. 58 p. (In Russian)
15. *Intensivnost otkazov elementov: spravochnik* [Element Failure Rate: Reference] [site]. Available at: <https://areliability.com/intensivnost-otkazov-elementov-spravochnik/> (accessed 03 Aug. 2025). (In Russian)
19. Denson W., Chandler G., Crowell W., Wanner R. Nonelectronic Parts Reliability Data. Chicago, IIT Research Institute, 1991. 632 p.
20. Electronic Reliability Design Handbook (MIL-HDBK-338B). New York, Air Force Research Laboratory Information, 1999. 1046 p.
21. Dhillon B.S. Engineering maintenance: A modern approach. Boca Raton, CRC Press LLC, 2000. 222 p.