

### УДК (UDC) 62-82:681.581.5

# ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАНАТНОЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСА

# PROBABILITY-TEMPORAL ANALYSIS OF RELIABILITY INDICATORS KINETICS AT THE STAGE OF DESIGNING A ROPE SYSTEM OF A MOBILE TRANSPORT AND RELOADING ROPEWAY

Лагерев А.В.<sup>1</sup>, Таричко В.И.<sup>2</sup>, Лагерев И.А.<sup>1</sup> Lagerev A.V.<sup>1</sup>, Tarichko V.I.<sup>2</sup>, Lagerev I.A.<sup>1</sup>

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)
 AO «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)
 Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)
 Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье представлен метод компьютерного моделирования протекания во времени процесса изменения показателей надежности ключевого структурного элемента мобильного канатного комплекса – канатной системы в целом. Метод базируется на разработанной вероятностной математической модели. На стадии проектирования мобильного канатного комплекса она позволяет прогнозировать кинетику показателей надежности при эксплуатации канатной системы как в целом, так и ее отдельных подсистем и конструктивных элементов с учетом сроков и объемов проведения ремонтновосстановительных работ, а также проводить моделирование эксплуатационной стадии жизненного цикла. Расчет вероятности нахождения канатной системы в возможных сочетаниях ее состояний в произвольный момент времени основан на решении системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, которая периодически перестраивается в моменты времени проведения плановых ремонтов мобильного канатного комплекса. Представлены результаты тестового примера расчета применительно к конкретному проектируемому мобильному канатному комплексу.

**Ключевые слова:** мобильный канатный комплекс, канатная система, надежность, вероятностновременной анализ

**Дата принятия к публикации:** 15.03.2020 **Дата публикации:** 25.06.2020

#### 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

**Таричко Вадим Игоревич** – кандидат технических наук, заместитель генерального директора –

Abstract. The article presents a method of computer simulation of the process of time-varying reliability indicators of a key structural element of a mobile ropeway - the rope system as a whole. The method is based on the developed probabilistic mathematical model. At the design stage of the mobile ropeway, it allows predicting the kinetics of reliability indicators during operation of the rope system as a whole, as well as its individual subsystems and structural elements, taking into account the timing and volume of repair and restoration work. She also conduct modeling of the operational stage of the life cycle. The calculation of the probability of finding the rope system in possible combinations of its states at an arbitrary point in time is based on the solution of the Chapman-Kolmogorov linear differential equation system, which is periodically rebuilt at the time moments of scheduled repairs of the mobile ropeway. The results of a test example of calculation in relation to a specific designed mobile ropeway are presented.

**Keywords:** mobile ropeway, rope system, reliability, probability-time analysis

Date of acceptance for publication:15.03.2020Date of publication:25.06.2020

#### 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

**Vadim I. Tarichko** – Candidate of Technical Sciences, Deputy general director – General designer, Bry-





главный конструктор АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: 32.6909@mail.ru

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

ansk 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

## 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

Мобильные транспортно-перегрузочные канатные комплексы в настоящее время представляют собой перспективный вид надземного транспорта особенно применительно к условиям использования на необорудованной местности и при повышенной критичности сроков проведения подготовительных операций по развертыванию транспортно-перегрузочных операций [1, 2].

Технологическое оборудование в виде канатной системы и поддерживающих ее опорных конструкций размещается на базовых шасси, как правило, на самоходных колесных или гусеничных шасси высокой грузоподъемности и проходимости и поэтому оно может быть использовано для быстрого создания переправ через водные преграды, овраги, ущелья, болотистую местность, очаги разрушений или природных катастроф. Мобильные канатные комплексы предназначены для применения в тех местах или в тех условиях, когда невозможно или не целесообразно создание капитальных сооружений (мостов, эстакад, туннелей, насыпей и т.п.), например, при выполнении строительномонтажных или ремонтных работ автономных объектов [3], при ликвидации последствий стихийных бедствий природного или техногенного характера [4], при производстве лесохозяйственных или сельскохозяйственных работ в горной или труднодоступной местности [5].

На рис. 1 показана модель мобильного комплекса на базе колесного шасси. Конст-

рукция мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов не предусматривает установку промежуточных опор и включает только конечные опоры, служащие для поддержания на определенной высоте над земной поверхностью канатной системы для транспортирования грузов и обеспечивающие необходимое натяжение несущих или несуще-тяговых стальных канатов.



Рис. 1. Модель мобильного канатного комплекса в масштабе 1:72

### 2. Постановка задачи

Эксплуатация подвесных канатных дорог и мобильных канатных комплексов связана с риском возникновения и развития аварийных ситуаций, приводящих к негативному воздействию на перевозимых людей или транспортируемые грузы. Прогнозирование и анализ риска таких аварийных ситуаций при эксплуатации основных узлов или канатных дорог в целом, как правило, основаны на применении хорошо известного в технике метода построения деревьев отказов [3, 6].





Основная проблема успешного применения этого метода заключается в том, что количественные расчеты вероятностей наступления отказов технических систем канатных дорог и комплексов требуют знания вероятностей индивидуальных отказов всех конструктивных элементов этих систем. Такая информация крайне ограничена, так как она находится путем статистической обработки имеющихся данных о произошедших отказах и не учитывает продолжительность эксплуатации до отказа. Как следствие, необходимые для прогнозирования риска возникновения аварийных ситуаций данные о вероятности безотказной работы конструктивных элементов носят осредненный характер и не отражают в полной мере индивидуальные особенности конструкции, режимов и продолжительности работы канатных дорог и комплексов, а также эффективность проводимых ремонтных мероприятий.

В любом случае в основе расчета технического риска лежит количественная оценка вероятности наступления аварийных событий. Это требует разработки расчетных методик прогнозирования изменения во времени показателей надежности и, в первую очередь, вероятностей критических отказов при работе исследуемого технического устройства, с учетом конкретных особенностей его конструкции и режимов эксплуатации.

В рамках данного исследования разработан метод компьютерного моделирования протекания во времени процесса изменения показателей надежности ключевого структурного элемента мобильного транспортноперегрузочного комплекса — его канатной системы.

#### 3. Структура канатной системы

Канатная система мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса состоит из трех структурных подсистем:

- гидравлической подсистемы, обеспечивающей гидравлический привод механизмов движения канатной системы: механизма движения несуще-тягового каната, механизма установки концевой опоры в рабочее положение и механизма ориентации канатного шкива;

- механической подсистемы, обеспечивающей передачу и преобразование вращательного движения и крутящего момента на выходном валу гидромотора в линейное перемещение и тяговое усилие несущетягового каната;
- информационно-управляющей подсистемы, обеспечивающей управление работой структурных элементов канатной системы, а также сбор, обработку, отображение и анализ в реальном режиме времени контролируемых количественных параметров функционального состояния канатной системы, формирование необходимых управляющих воздействий.

На рис. 1 показана обобщенная структурная схема канатной системы, включающая структурные схемы указанных подсистем, а в табл. 1 приведен примерный перечень структурных элементов этих подсистем и дана их нумерация, которая далее используется в расчетных зависимостях математической модели.

Структурные элементы разбиты на две подгруппы в зависимости от степени тяжести последствий их отказа на работоспособность канатной системы в целом:

- элементы, приводящие к критическому отказу;
- элементы, не приводящие к критическому отказу.

Под критическим отказом понимается такой отказ, который приводит к потере работоспособности канатной системы (ее переходу в неработоспособное состояние) и требует немедленной остановки работы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. Под некритическим отказом понимается такой отказ, который не приводит к потере работоспособности канатной системы, а лишь обуславливает ее переход в неисправное состояние, что не требует немедленной остановки работы комплекса.

#### 4. Математическая модель

С точки зрения теории надежности в процессе своего функционирования канатная система мобильного канатного комплекса может находиться в одном их трех возмож-





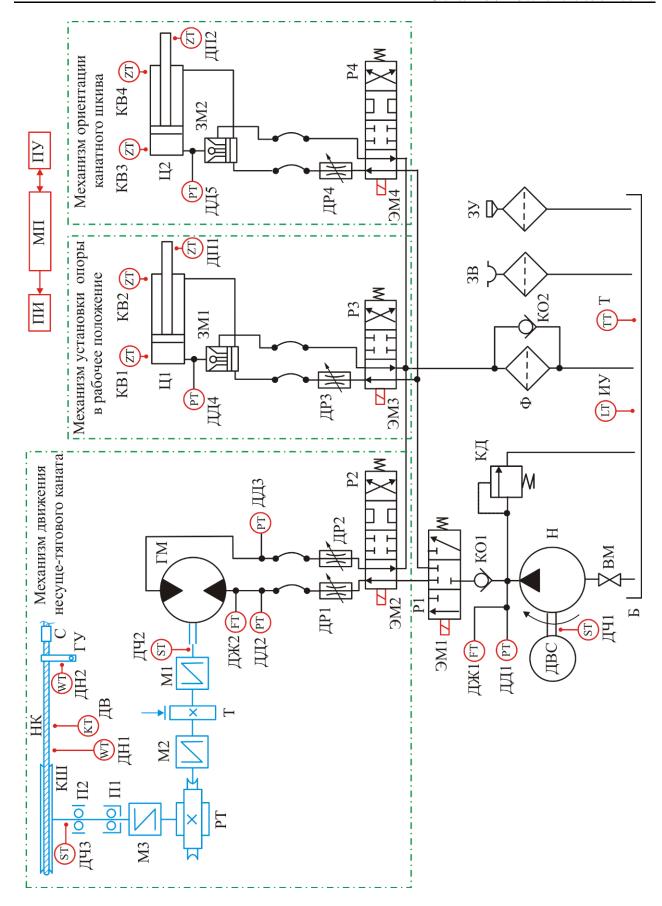


Рис. 2. Обобщенная структурная схема канатной системы





Таблица 1 Перечень обозначений и нумерация элементов структурных подсистем канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса

Обозначение	Номер	Описание структурного элемента						
		ский привод механизмов движения канатной системы						
Элементы, приводящие к критическому отказу								
Н	h1,1	Объемный нерегулируемый насос						
ГМ	h1,2	Гидромотор механизма движения несуще-тягового каната						
Ц1	h1,3	Поршневой гидроцилиндр двухстороннего действия с одностор						
***		ним штоком механизма установки опоры в рабочее положение						
Ц2	h1,4	Поршневой гидроцилиндр двухстороннего действия с односторон-						
Б	h1,5	ним штоком механизма ориентации канатного шкива						
		Гидробак для работы под атмосферным давлением						
КД	h1,6	Предохранительный клапан прямого действия						
Ф	h1,7	Сливной фильтр						
P1	h1,8	Входной гидрораспределитель						
P2	h1,9	Гидрораспределитель механизма движения несуще-тягового каната						
Р3	h1,10	Гидрораспределитель механизма установки опоры в рабочее положение						
P4	h1,11	Гидрораспределитель механизма ориентации канатного шкива						
ДР1, ДР2	h1,12	Регулируемые дроссели механизма движения несуще-тягового каната						
3M1	h1,13	Односторонний гидрозамок фиксации опоры в рабочем положении						
3M2	h1,14	Односторонний гидрозамок фиксации канатного шкива						
	h1,15	Гидролинии (металлические трубопроводы)						
	<i>h</i> 1,16	Гидролинии (гибкие рукава)						
	h1,17	Устройства соединения гидролиний - частично						
Элементы, пр	риводяшие	к некритическому отказу						
BM	h2,1	Входной вентиль						
КО1	h2,2	Клапан обратный в напорной гидролинии						
КО2	h2,3	Клапан обратный в сливной гидролинии						
3У	h2,4	Заливное устройство						
3B	h2,5	Воздухозаборное устройство с фильтром						
ДР3	h2,6	Регулируемый дроссель механизма установки опоры в рабочее по-						
<u> </u>	1,2,0	ложение						
ДР4	h2,7	Регулируемый дроссель механизма ориентации канатного шкива						
	h2,8	Устройства соединения гидролиний - частично						
	h2,9	Рабочая жидкость						
Механический привод механизма движения несуще-тягового каната								
		к критическому отказу						
КШ	<i>m</i> 1,1	Канатный шкив						
НК	m1,2	Несуще-тяговый стальной канат						
ГУ	m1,3	Грузозахватное устройство для подвешивания груза						
С	m1,4	Счалочное устройство						
	, -	J 1						





Продолжение табл. 1

		продолжение таол. 1				
Обозначение	Номер	Описание структурного элемента				
PT	<i>m</i> 1,5	Редуктор червячный или планетарный				
T	<i>m</i> 1,6	Тормоз				
M1, M2, M3	m1,7	Упругие соединительные муфты				
П1	m1,8	Упорно-радиальный сферический роликоподшипник				
П2	m1,9	Радиальный сферический шарикоподшипник				
	m1,10	Передаточные валы				
	. , -	Информационно-управляющая система				
Элементы. пр	пводящие	к критическому отказу				
МП	<i>e</i> 1,1	Управляющий микропроцессор				
ПУ	<i>e</i> 1,2	Панель управления работой канатной системы				
ПИ	e1,3	Панель информации о количественных параметрах текущего со-				
1111	e1,5	стояния исполнительных подсистем канатной системы				
ЭМ1	e1,4	Электромагнит управления входным гидрораспределителем				
ЭМ2	e1,5	Электромагнит управления гидрораспределителем механизма дви-				
J1V12	e1,5	жения несуще-тягового каната				
ЭМ3	e1,6	Электромагнит управления гидрораспределителем механизма уста-				
31.10		новки опоры в рабочее положение				
ЭМ4	e1,7	Электромагнит управления гидрораспределителем механизма ори-				
		ентации канатного шкива				
ДЧ1 (ST)	e1,8	Датчик частоты вращения входного вала насоса (бесшкальный, с				
		дистанционной электропередачей показаний)				
ДЧ3 (ST)	e1,9	Датчик частоты вращения вала канатного шкива (бесшкальный, с				
		дистанционной электропередачей показаний)				
ДН1 (WT)	e1,10	Датчик натяжения несуще-тягового каната (бесшкальный, с дис-				
THE (THE)		танционной электропередачей показаний)				
ДН2 (WT)	e1,11	Датчик веса транспортируемого груза (бесшкальный, с дистанци-				
IID (IZT)	110	онной электропередачей показаний)				
ДВ (КТ)	e1,12	Датчик отсчета времени движения несуще-тягового каната (бесшкальный, с дистанционной электропередачей показаний)				
Promounii nr	<u>Пооданию</u>	к некритическому отказу				
ДД1 (PT)	<i>e</i> 2,1	Датчик давления на выходе насоса (бесшкальный, с дистанционной				
дді (ГТ)	C 2,1	электропередачей показаний)				
ДД2, ДД3	e2,2	Датчики давления в подводящих гидролиниях гидромотора (бес-				
(PT)	-,-	шкальные, с дистанционной электропередачей показаний)				
ДД4 (РТ)	e2,3	Датчик давления на входе гидроцилиндра установки опоры в рабо-				
		чее положение (бесшкальный, с дистанционной электропередачей				
		показаний)				
ДД5 (РТ)	e2,4	Датчик давления на входе гидроцилиндра ориентации канатного				
		шкива (бесшкальный, с дистанционной электропередачей показа-				
		ний)				
ДЖ1 (FT)	e2,5	Датчик объемной подачи насоса (бесшкальный, с дистанционной				
писа (гт)	2.5	электропередачей показаний)				
ДЖ2 (FT)	e2,6	Датчик объемного расхода гидромотора (бесшкальный, с дистан-				
пиз (ст)	e2,7	ционной электропередачей показаний)				
ДЧ2 (ST)	e 2, 1	Датчик частоты вращения выходного вала гидромотора (бесшкальный, с дистанционной электропередачей показаний)				
	1	пын, с дистанционной электропередачей показании)				





#### Окончание табл. 1

Обозначение	Номер	Описание структурного элемента			
ДП1 (ZT)	e2,8	Датчик углового положения опоры (бесшкальный, с дистанционной			
		электропередачей показаний)			
ДП2 (ZT)	e2,9	Датчик углового положения канатного шкива (бесшкальный, с дис-			
		танционной электропередачей показаний)			
KB1 (ZT)	e2,10	Концевой выключатель для крайнего нижнего положения опоры			
KB2 (ZT)	e2,11	Концевой выключатель для крайнего верхнего положения опоры			
KB3 (ZT)	e2,12	Концевой выключатель для крайнего нижнего положения канатно-			
		го шкива			
KB4 (ZT)	e2,13	Концевой выключатель для крайнего верхнего положения канатно-			
		го шкива			
ИУ (LT)	e2,14	Измеритель уровня жидкости в гидробаке (бесшкальный, с дистан-			
		ционной электропередачей показаний)			
T (TT)	e2,15	Датчик температуры жидкости в гидробаке (бесшкальный, с дис-			
		танционной электропередачей показаний )			

ных сочетаний состояний:

- 1) исправном и работоспособном состояниях;
- 2) неисправном и работоспособном состояниях;
- 3) неисправном и неработоспособном состояниях.

Первый случай полностью соответствует штатной работе комплекса. Во втором случае работа комплекса вполне возможна, хотя и требуется предусмотреть проведение во время одного из ближайших плановых перерывов в работе необходимых восстановительных операций для тех элементов, у которых произошел некритический отказ (табл. 1). В третьем случае работа комплекса 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 канатной системы в третье сочетание возможных состояний, должны быть использованы для оценки технического риска.

Канатная система мобильного канатного комплекса состоит из значительного числа элементов (табл. 1), которые являются потенциально опасными с точки зрения возможности их отказа в процессе эксплуатации. Гидравлическая подсистема включает  $n_{h1}$ = 17 элементов, приводящих к критическому отка-

зу, и  $n_{h2}=9$  элементов, приводящих к некритическому отказу. Для механической подсистемы число элементов, приводящих к критическому отказу, составляет  $n_{m1}=10$ . В состав информационно-управляющей подсистемы входят  $n_{e1}=12$  элементов, приводящих к критическому отказу, и  $n_{e2}=15$  элементов, приводящих к некритическому отказу. Таким образом, общее число элементов, приводящих к критическому отказу, составляет  $N_1=39$ , а общее число элементов, приводящих к некритическому отказу, -  $N_2=24$ .

При анализе вероятности нахождения канатной системы в процессе ее эксплуатации в неработоспособном состоянии следует учитывать, что в произвольный момент времени она может находиться в одном из следующих возможных состояний:

- одном работоспособном состоянии  $S_0$  (оно характеризуется нахождением всех потенциально опасных элементов в работоспособном);
- одном из нескольких неработоспособных состояний  $S_1, S_2, ..., S_m$  ,..., $S_{N_1}$  (каждое состояние характеризуется нахождением одного соответствующего m-го элемента в неработоспособном состоянии при работоспособном состоянии всех остальных  $N_1$  –1 элементов).





При анализе вероятности нахождения канатной системы в процессе ее эксплуатации в неисправном состоянии следует учитывать, что в произвольный момент времени она может находиться в одном из следующих возможных состояний:

- одном исправном состоянии  $T_0$  (оно характеризуется нахождением всех потенциально опасных элементов в исправном состоянии и соответствием свойств рабочей жидкости требованиям эксплуатационной документации);
- одном из нескольких неисправных состояний  $T_1, T_2, ..., T_n$  ,...,  $T_{N_2}$  (каждое состояние характеризуется нахождением одного соответствующего m-го элемента в неисправном состоянии при исправном состоянии всех остальных  $N_2-1$  элементов).

Таким образом, общее число возможных состояний канатной системы составляет:

- при анализе вероятности нахождения канатной системы в неработоспособном состоянии

$$M_1 = n_{h1} + n_{m1} + n_{e1} + 1. (1)$$

- при анализе вероятности нахождения канатной системы в неисправном состоянии

$$M_2 = n_{h2} + n_{e2} + 1. (2)$$

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. Применительно к критическим отказам это допущение является полностью корректным, применительно к некритическим отказам — приближенно корректным, так как при возникновении таких отказов ка-

натная система может эксплуатироваться в течение еще какого-то промежутка времени до проведения восстановительных мероприятий во время планового перерыва в работе мобильного канатного комплекса.

С учетом данного допущения на рис. 3 построены графы возможных состояний и связывающих их переходов при эксплуатации канатной системы в целом. Они представляют собой композицию соответствующих графов (рис. 4 и 5) отдельных подсистем.

На рис. 4 приведены графы возможных состояний и связывающих их переходов при эксплуатации периодически восстанавливаемых подсистем канатной системы, а на рис. 5 - графы возможных состояний и связывающих их переходов периодически ремонтируемых подсистем.

Количественной характеристикой перехода у-й подсистемы из работоспособного состояния  $S_{v,0}$  в неработоспособное  $S_{v,m}$ , вызванного отказом т-го элемента, является интенсивность отказов  $\lambda_{v1.m}$  этого элемента. Количественной характеристикой обратного перехода из неработоспособного состояния  $S_{v,m}$  в работоспособное  $S_{v,0}$ , вызванного восстановлением или заменой ранее отказавшего т-го элемента, является интенсивность восстановления  $\mu_{v1,m}$  этого элемента. Аналогично количественно характеризуются переходы из исправного состояния  $T_{v,0}$  в неисправное  $T_{v,m}$  - интенсивностью отказов и интенсивностью восстановления  $\mu_{v2,m}$ .

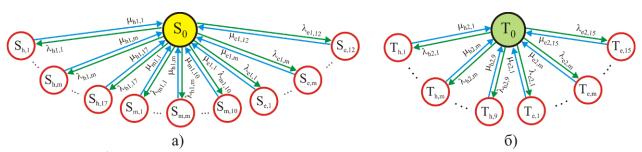


Рис. 3. Графы возможных состояний и связывающих их переходов при эксплуатации канатной системы: а – при критических отказах; б – при некритических отказах





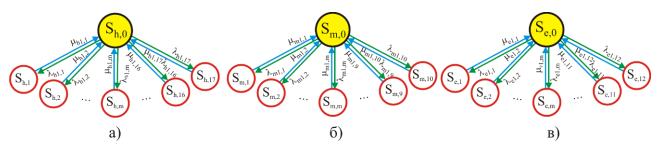


Рис. 4. Графы возможных состояний и связывающих их переходов при эксплуатации периодически восстанавливаемых подсистем канатной системы: а — гидравлической; б - механической; в — информационно-управляющей

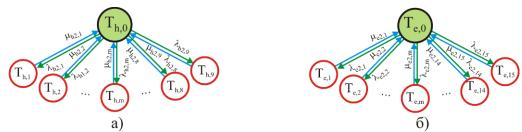


Рис. 5. Графы возможных состояний и связывающих их переходов при эксплуатации периодически ремонтируемых подсистем канатной системы: а – гидравлической; б – информационно-управляющей

Вероятности  $P_0, P_1, ..., P_m, ..., P_{M_1}$  ( $U_0, U_1, ..., U_m, ..., U_{M_2}$ ) нахождения канатной системы в произвольный момент времени эксплуатации во всех возможных состояниях  $S_0, S_1, ..., S_m, ..., S_{M_1}$  ( $T_0, T_1, ..., T_m, ..., T_{M_2}$ ) могут быть определены с помощью системы уравнений Колмогорова-Чепмена [7]. Она явля-

ется системой обыкновенных дифференциальных уравнений I порядка. Для графов на рис. 3 эта система выражается следующим образом:

- при анализе перехода канатной системы из работоспособного в неработоспособное состояние

$$\begin{vmatrix} \dot{P}_{0} \\ \dot{P}_{h,1} \\ \vdots \\ \dot{P}_{h,17} \\ \dot{P}_{m,1} \\ \vdots \\ \dot{P}_{e,12} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{1} & \mu_{h1,1} & \dots & \mu_{h1,17} & \mu_{m1,1} & \dots & \mu_{m1,10} & \mu_{e1,1} & \dots & \mu_{e1,12} \\ \lambda_{h1,1} & -\mu_{h1,1} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{h1,17} & 0 & \dots & -\mu_{h1,17} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{m1,17} & 0 & \dots & 0 & -\mu_{m1,1} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots \\ \dot{P}_{m,10} \\ \dot{P}_{e,1} \\ \vdots \\ \dot{P}_{e,12} \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} -A_{1} & \mu_{h1,1} & \dots & \mu_{h1,17} & \mu_{m1,1} & \dots & \mu_{m1,10} & \mu_{e1,1} & \dots & \mu_{e1,12} \\ \lambda_{h1,1} & -\mu_{h1,1} & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{m1,17} & 0 & \dots & 0 & -\mu_{m1,1} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{m1,10} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -\mu_{m1,10} & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{e1,1} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & -\mu_{e1,1} & \dots \\ \lambda_{e1,12} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -\mu_{e1,12} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{0} \\ P_{h,1} \\ \vdots \\ P_{h,17} \\ P_{m,1} \\ \vdots \\ P_{m,10} \\ P_{e,1} \\ \vdots \\ P_{e,12} \end{pmatrix}; (3)$$

- при анализе перехода канатной системы из исправного в неисправное состояние





$$\begin{cases} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{h,1} \\ \dots \\ \dot{U}_{h,9} \\ \dot{U}_{e,1} \\ \dots \\ \dot{U}_{e,15} \end{cases} = \begin{bmatrix} -\varLambda_2 & \mu_{h1,1} & \dots & \mu_{h1,9} & \mu_{e1,1} & \dots & \mu_{e1,15} \\ \lambda_{h2,1} & -\mu_{h1,1} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{h2,1} & 0 & \dots & -\mu_{h1,9} & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{h2,1} & 0 & \dots & 0 & -\mu_{e1,1} & \dots & 0 \\ \lambda_{h2,1} & 0 & \dots & 0 & -\mu_{e1,1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{h2,1} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -\mu_{e1,15} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_0 \\ U_{h,1} \\ \dots \\ U_{e,9} \\ U_{e,1} \\ \dots \\ U_{e,15} \end{pmatrix}, \tag{4}$$
 где  $\Lambda_1 = \sum_{m=1}^{m=n_{h1}} \lambda_{h1,m} + \sum_{m=1}^{m=n_{e1}} \lambda_{m1,m} + \sum_{m=1}^{m=n_{e1}} \lambda_{e1,m} \; ; \; \Lambda_2 = \sum_{m=1}^{m=n_{h2}} \lambda_{h2,m} + \sum_{m=1}^{m=n_{e2}} \lambda_{e2,m} \; .$  Аналогичным образом можно вычислить - при анализе перехода гидравлической вероятности нахождения отдельных подсистемы из работоспособного в нерабо-

где 
$$\Lambda_1 = \sum_{m=1}^{m=n_{h1}} \lambda_{h1,m} + \sum_{m=1}^{m=n_{m1}} \lambda_{m1,m} + \sum_{m=1}^{m=n_{e1}} \lambda_{e1,m}$$
;  $\Lambda_2 = \sum_{m=1}^{m=n_{h2}} \lambda_{h2,m} + \sum_{m=1}^{m=n_{e2}} \lambda_{e2,m}$ 

тем канатной системы в произвольный мо- тоспособное состояние мент времени эксплуатации во всех возможных состояниях:

вероятности нахождения отдельных подсис- подсистемы из работоспособного в нерабо-

$$\begin{cases}
\dot{P}_{h,0} \\
\dot{P}_{h,1} \\
\vdots \\
\dot{P}_{h,m} \\
\vdots \\
\dot{P}_{h,17}
\end{cases} = \begin{bmatrix}
-\sum_{m=1}^{m=n_{h1}} \lambda_{h1,m} & \mu_{h1,1} & \dots & \mu_{h1,m} & \dots & \mu_{h1,17} \\
\lambda_{h1,1} & -\mu_{h1,1} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\lambda_{h1,m} & 0 & \dots & -\mu_{h1,m} & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\lambda_{h1,17} & 0 & \dots & 0 & \dots & -\mu_{h1,17}
\end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{h,0} \\ P_{h,1} \\ \vdots \\ P_{h,m} \\ \vdots \\ P_{h,m} \\ \vdots \\ P_{h,17} \end{pmatrix};$$
(5)

- при анализе перехода гидравлической подсистемы из исправного в неисправное состояние

$$\begin{cases}
\dot{U}_{h,0} \\
\dot{U}_{h,1} \\
\vdots \\
\dot{U}_{h,m} \\
\vdots \\
\dot{U}_{h,9}
\end{cases} = \begin{bmatrix}
-\sum_{m=1}^{m=n_{h2}} \lambda_{h2,m} & \mu_{h2,1} & \dots & \mu_{h2,m} & \dots & \mu_{h2,9} \\
-\sum_{m=1}^{m=1} \lambda_{h2,m} & -\mu_{h2,1} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
\vdots \\
\lambda_{h2,1} & -\mu_{h2,1} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
\vdots \\
\lambda_{h2,m} & 0 & \dots & -\mu_{h2,m} & \dots & 0 \\
\vdots \\
\lambda_{h2,9} & 0 & \dots & 0 & \dots & -\mu_{h2,9}
\end{bmatrix} \cdot \begin{cases}
U_{h,0} \\
U_{h,1} \\
\vdots \\
U_{h,m} \\
\vdots \\
U_{h,m} \\
\vdots \\
U_{h,9}
\end{cases};$$
(6)

- при анализе перехода механической подсистемы из работоспособного в неработоспособное состояние

$$\begin{cases}
\dot{P}_{m,0} \\
\dot{P}_{m,1} \\
\vdots \\
\dot{P}_{m,m} \\
\vdots \\
\dot{P}_{m,10}
\end{cases} = \begin{bmatrix}
-\sum_{m=1}^{m=n_{m1}} \lambda_{m1,m} & \mu_{m1,1} & \dots & \mu_{m1,m} & \dots & \mu_{m1,10} \\
\lambda_{m1,1} & -\mu_{m1,1} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\lambda_{m1,m} & 0 & \dots & -\mu_{m1,m} & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\lambda_{m1,10} & 0 & \dots & 0 & \dots & -\mu_{m1,10}
\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}
P_{m,0} \\
P_{m,1} \\
\vdots \\
P_{m,m} \\
\vdots \\
P_{m,m} \\
\vdots \\
P_{m,m}
\end{bmatrix};$$
(7)

- при анализе перехода информационно-управляющей подсистемы из работоспособного в неработоспособное состояние





$$\begin{cases}
\dot{P}_{e,0} \\
\dot{P}_{e,1} \\
\vdots \\
\dot{P}_{e,m} \\
\vdots \\
\dot{P}_{e,12}
\end{cases} = \begin{bmatrix}
-\sum_{m=1}^{m=n_{e1}} \lambda_{e1,m} & \mu_{e1,1} & \dots & \mu_{e1,m} & \dots & \mu_{e1,12} \\
-\sum_{m=1}^{m=1} \lambda_{e1,m} & -\mu_{e1,1} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\lambda_{e1,1} & -\mu_{e1,1} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\lambda_{e1,1} & 0 & \dots & -\mu_{e1,m} & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\lambda_{e1,12} & 0 & \dots & 0 & \dots & -\mu_{e1,12}
\end{bmatrix} \cdot \begin{cases}
P_{e,0} \\
P_{e,1} \\
\vdots \\
P_{e,m} \\
\vdots \\
P_{e,m} \\
\vdots \\
P_{e,12}
\end{cases};$$
(8)

- при анализе перехода информационно-управляющей подсистемы из исправного в неисправное состояние

$$\begin{cases}
\dot{U}_{e,0} \\
\dot{U}_{e,1} \\
\vdots \\
\dot{U}_{e,m} \\
\vdots \\
\dot{U}_{e,15}
\end{cases} = \begin{bmatrix}
-\sum_{m=1}^{m=n_{e^2}} \lambda_{e2,m} & \mu_{e2,1} & \dots & \mu_{e2,m} & \dots & \mu_{e2,15} \\
\lambda_{e2,1} & -\mu_{e2,1} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
\vdots \\
\lambda_{e2,m} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
\lambda_{e2,m} & 0 & \dots & -\mu_{e2,m} & \dots & 0 \\
\vdots \\
\lambda_{e2,15} & 0 & \dots & 0 & \dots & -\mu_{e2,15}
\end{bmatrix} \cdot \begin{cases}
U_{h,0} \\
U_{h,1} \\
\vdots \\
U_{h,m} \\
\vdots \\
U_{h,m} \\
\vdots \\
U_{h,15}
\end{cases} .$$
(9)

Для решения систем дифференциальных уравнений (3) — (9) необходимо задать начальные условия. Они включают множество значений вероятностей  $P_m$  или  $U_m$  в момент

ввода канатной системы и ее подсистем в эксплуатацию (при  $\tau = \tau_0 = 0$ ).

Векторы начальных условий для систем дифференциальных уравнений (3) – (9) имеют соответственно следующий вид:

$$\begin{cases} P_{0}(\tau=0) \\ P_{h,1}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ P_{m,1}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{m,10}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{e,1}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{e,12}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}; \begin{cases} U_{0}(\tau=0) \\ U_{h,1}(\tau=0) \\ \dots \\ U_{h,9}(\tau=0) \\ \dots \\ U_{e,15}(\tau=0) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}; \begin{cases} P_{h,0}(\tau=0) \\ P_{h,1}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,m}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}; \begin{cases} U_{h,0}(\tau=0) \\ U_{h,1}(\tau=0) \\ \dots \\ U_{h,m}(\tau=0) \\ \dots \\ U_{h,9}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}; \begin{cases} P_{h,0}(\tau=0) \\ P_{h,1}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}; \begin{cases} P_{h,0}(\tau=0) \\ P_{h,1}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}; \begin{cases} P_{h,0}(\tau=0) \\ P_{h,1}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}; \begin{cases} P_{h,0}(\tau=0) \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases}; \begin{cases} P_{h,0}(\tau=0) \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \end{cases} = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ P_{h,17}(\tau=0) \\$$





Системы уравнений (3), (5), (7) и (8) позволяют прогнозировать процесс изменения во времени вероятности безотказной работы канатной системы  $P_{rs}(\tau)$  и ее подсистем  $P_h(\tau)$ ,  $P_m(\tau)$  и  $P_e(\tau)$ , так как

$$P_{rs}(\tau) = P_0(\tau); \quad P_h(\tau) = P_{h,0}(\tau);$$
  
 $P_m(\tau) = P_{m,0}(\tau); \quad P_e(\tau) = P_{e,0}(\tau).$  (11)

Сумма всех остальных вероятностей выражает вероятность нахождения канатной системы  $Q_{rs}(\tau)$  и ее подсистем  $Q_h(\tau)$ ,  $Q_m(\tau)$  и  $Q_e(\tau)$  в неработоспособном состоянии:

$$Q_{rs}(\tau) = 1 - P_{rs}(\tau) =$$

$$= \sum_{m=1}^{m=n_{h1}} P_{h,m}(\tau) + \sum_{m=1}^{m=n_{m1}} P_{m,m}(\tau) + \sum_{m=1}^{m=n_{e1}} P_{e,m}(\tau); \quad (12)$$

$$Q_{h}(\tau) = 1 - P_{h}(\tau) = \sum_{m=1}^{m=n_{h1}} P_{h,m}(\tau);$$

$$Q_{m}(\tau) = 1 - P_{m}(\tau) = \sum_{m=1}^{m=n_{m1}} P_{m,m}(\tau);$$

$$Q_{e}(\tau) = 1 - P_{e}(\tau) = \sum_{m=1}^{m=n_{e1}} P_{e,m}(\tau).$$

Отношение  $P_m(\tau)/Q_{rs}(\tau)$  можно рассматривать как относительный индивидуальный вклад критического отказа m-го элемента канатной системы в снижение общего уровня ее надежности в произвольный момент времени  $\tau$ . Отношения  $P_{h,m}(\tau)/Q_h(\tau)$ ,  $P_{m,m}(\tau)/Q_m(\tau)$  и  $P_{e,m}(\tau)/Q_e(\tau)$  можно рассматривать как относительный индивидуальный вклад критического отказа m-го элемента подсистемы канатной системы в снижение общего уровня надежности этой подсистемы в произвольный момент времени  $\tau$ .

Системы уравнений (4), (6) и (9) позволяют прогнозировать процесс изменения во времени вероятности исправной работы канатной системы  $U_{rs}(\tau)$  и ее подсистем  $U_h(\tau)$ ,  $U_m(\tau)$  и  $U_e(\tau)$ , так как

$$U_{rs}(\tau) = U_0(\tau); \ U_h(\tau) = U_{h,0}(\tau);$$
  
 $U_e(\tau) = U_{e,0}(\tau).$  (13)

Сумма всех остальных вероятностей выражает вероятность нахождения канатной системы  $V_{rs}(\tau)$  и ее подсистем  $V_h(\tau)$  и  $V_e(\tau)$  в неисправном состоянии:

$$\begin{split} V_{rs}(\tau) &= 1 - U_{rs}(\tau) = \sum_{m=1}^{m - n_{h2}} U_{h,m}(\tau) + \sum_{m=1}^{m - n_{e2}} U_{e,m}(\tau); \\ V_{h}(\tau) &= 1 - U_{h}(\tau) = \sum_{m=1}^{m - n_{h2}} U_{h,m}(\tau); \\ V_{e}(\tau) &= 1 - U_{e}(\tau) = \sum_{m=1}^{m - n_{e2}} U_{e,m}(\tau). \end{split} \tag{14}$$

Решение систем (3) - (9) при начальных условиях (10) адекватно характеризует изменение во времени показателей надежности до момента первого планового ремонта или планового технического обслуживания  $\tau_{r,1}$ . Моменты плановых ремонтов и технических обслуживаний  $\tau_{r,n}$  устанавливаются еще на этапе проектирования мобильного канатного комплекса и, таким образом, связаны с ремонтом тех структурных элементов канатной системы и ее подсистем, которые не приводят к критическому отказу, влекущему за собой немедленную остановку работы и проведение восстановительных операций.

На рис. 6 приведен график изменения во времени вероятности исправной работы канатной системы  $U_{rs}(\tau)$  при наличии периодических ремонтов и при их отсутствии. Аналогичные формы имеют также графики изменения во времени вероятностей исправной работы гидравлической и информационно-управляющей подсистем.

В момент времени  $\tau_{r,1}$  производится ремонт (или настройка) одного или нескольких структурных элементов. Поэтому вероятность нахождения произвольного m-го элемента в неисправном состоянии скачкообразно уменьшаются от  $U_m(\tau_{r,1}-0) = U_m(\tau_{r,1})$ до значения  $U_m(\tau_{r,1}+0)=0$ . Вероятность нахождения канатной системы и ее подсистем в исправном состоянии скачкообразно увеличивается с  $U_0(\tau_{r,1}-0)=U_0(\tau_{r,1})$  на величину суммы вероятностей  $U_m(\tau_{r,1})$  отремонтированных элементов. Поэтому с момента времени  $\tau_{r,1}$  интегрирование систем дифференциальных уравнений (4), (6) и (9) должно осуществляться при новых векторах начальных условий, принимающих соответственно следующий вид:





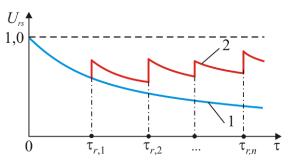


Рис. 6. Кинетика вероятности исправной работы канатной системы: 1 - без проведения ремонтов; 2 - с проведением ремонтов

где  $n_{h2,r,1}$ ,  $n_{e2,r,1}$ - число элементов гидравлической и информационно-управляющей подсистем, которые были планово отремонтированы в момент времени эксплуатации мобильного канатного комплекса, соответствующего моменту времени планового ремонта  $\tau_{r,1}$ .

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

Аналогично изменяются векторы начальных условий (15) для других моментов времени  $\tau_{r,n}$ . Таким образом, процесс прогнозирования изменения во времени показателей надежности канатной системы и ее подсистем, определяющих их нахождение в исправном или неисправном состояниях, при проведении плановых ремонтных мероприятий элементов после некритического отказа (кривая 2 на рис. 6) сводится к поочередному интегрированию систем дифференциальных уравнений (4), (6) и (9) в пределах последовательно расположенных временных интер-





валов  $au_{r,n} \leq au \leq au_{r,n+1}$  при периодическом переформировании векторов начальных условий (15) в начальной точке каждого такого интервала  $au_{r,n}$ .

Несмотря на проведение плановых ремонтов и технических обслуживаний, в реальных условиях эксплуатации наблюдаются случайные критические отказы структурных элементов транспортно-перегрузочных машин и оборудования [8], приводящие к невозможности дальнейшей их работы. Это требует проведения немедленного внепланового восстановления или замены отказавших элементов. Такие критические отказы случайных структурных элементов канатной системы являются случайными событиями, вследствие чего моменты времени их наступления являются случайными величинами. Поэтому учет влияния таких отказов на изменение показателей надежности требует применения имитационного моделирования работы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса [9, 10], что выходит за рамки данного исследования.

Возможным подходом, направленным на обеспечение безопасности работы канатной системы в условиях возможных критических отказов, может являться упреждающая замена структурных элементов с критическими отказами в моменты времени плановых ремонтов мобильного канатного комплекса. В качестве критерия необходимости восстановления или замены потенциально опасного элемента в момент времени  $\tau_{r,i}$  целесообразно принять достижение произвольным m-м элементом предельно допустимого значения вероятности отказа:

$$P_{h,m}(\tau_{r,i})\!\geq\! [P_{h,m}], \quad P_{m,m}(\tau_{r,i})\!\geq\! [P_{m,m}]$$

или

$$P_{e,m}(\tau_{r,i}) \ge [P_{e,m}],$$
 (16)

где  $[P_{v,m}]$  - предельно допустимого значения вероятности отказа m-го элемента v-й подсистемы.

Величины  $[P_{v,m}]$  индивидуальны для каждого структурного элемента канатной системы. Их меньшие значения должны соответствовать наиболее ответственным и дорогостоящим элементам, критический отказ которых способен привести с большему ущербу как вследствие повышенной длительности, так и вследствие повышенных затрат на проведение восстановительных операций. Задание малых значений  $[P_{v,m}]$ будет приводить к необходимости более частого восстановления структурных элементов и, таким образом, к повышенным трудовым и материально-финансовым затратам, хотя величина технического риска  $R_t$  для канатной системы будет низкой. В противном случае, при допущении более высоких значений  $[P_{v,m}]$  затраты на восстановительные работы будут снижаться, однако величина технического риска будет возрастать. Таким образом, обоснованное задание предельных вероятностей  $[P_{v,m}]$  является важной технической задачей и требует оценки на основе технико-экономической оптимизации.

Учет факта восстановления ряда структурных элементов канатной системы, приводящих к критическим отказам, во время планового ремонта  $\tau_{r,i}$  требует выявления тех элементов, которые удовлетворяют критериям (16) и выполнить корректировку векторов начальных условий для дальнейшего интегрирования дифференциальных уравнений (3), (5), (7) и (8) на очередной межремонтный период  $\tau \in (\tau_{r,i}; \tau_{r,i+1}]$ . Корректировка выполняется аналогично рассмотренной выше применительно к учету ремонта структурных элементов канатной системы, приводящих к некритическим отказам.

Таким образом, векторы начальных условий принимают следующий вид (в них принято, что восстанавливаются m-е элементы):





где  $n_{v1,r,i}$ - число элементов с критическими отказами v-й подсистемы, которые были восстановлены в момент времени эксплуатации мобильного канатного комплекса, соответствующего моменту времени i-го планового ремонта  $\tau_{r,i}$ .

Графики изменения во времени вероятности безотказной работы канатной системы в

целом и ее отдельных подсистем аналогичны показанному на рис. 6.

# 4. Компьютерная реализация математической модели

Разработанная методика прогнозирования изменения во времени эксплуатации показателей надежности канатной системы мо-





бильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса была реализована в виде компьютерного программы «Моделирование кинетики показателей надежности механизма движения канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса».

Структурная схема программы включает в себя головную процедуру Kinetics\_of\_Reability\_of\_Rope\_System и 5 процедур типа Procedure:

- *Det\_DetP* вычисление правой части уравнений Колмогорова-Чепмена (3) (9) умножениие матрицы на вектор;
- *Kinetica* решение системы уравнений Колмогорова-Чепмена методом Рунге-Кутта IV порядка;
- *Matrix* построение матрицы системы дифференциальных уравнений (5) (9) для подсистемы;
- *MatrixPrs* построение матрицы системы дифференциальных уравнений (3) для канатной системы при безотказной работе;
- *MatrixUrs* построение матрицы системы дифференциальных уравнений (4) для канатной системы при исправной работе.

Результатом выполнения компьютерной программы является расчет изменения во времени в течение нормативного срока службы канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса следующих данных:

- 1) вероятностей нахождения канатной системы в безотказном состоянии и в возможных состояниях, соответствующих критическим отказам структурных элементов, с учетом восстановления отдельных элементов, достигших допустимого значения вероятности отказа к моменту времени проведения очередного планового ремонта;
- 2) вероятностей нахождения канатной системы в исправном состоянии и в возможных состояниях, соответствующих некритическим отказам структурных элементов, с учетом ремонта отдельных элементов, исчерпавших допустимый срок эксплуатации к моменту времени проведения очередного планового ремонта;
- 3) вероятностей нахождения отдельных подсистем канатной системы в безотказном

состоянии и в возможных состояниях, соответствующих критическим отказам структурных элементов, с учетом восстановления отдельных элементов этих подсистем, достигших допустимого значения вероятности отказа к моменту времени проведения очередного планового ремонта;

4) вероятностей нахождения отдельных подсистем канатной системы в исправном состоянии и в возможных состояниях, соответствующих некритическим отказам структурных элементов, с учетом ремонта отдельных элементов этих подсистем, исчерпавших допустимый срок эксплуатации к моменту времени проведения очередного планового ремонта.

# 5. Тестовый анализ математической модели

Тестовая оценка особенностей ее использования для анализа надежности и адекватность получаемых результатов были проведены применительно к конструкции механизма движения мобильного комплекса протяженностью 200 м с гидравлическим частотно-дроссельным регулированием скорости перемещения груза весом до 100 кН [11]. Периодичность плановых ремонтов принята в размере 4000 ч, заданного срока эксплуатации мобильного канатного комплекса 40000 ч. Значения интенсивности отказов  $\lambda_m$ структурных элементов, входящих в конструкцию канатной системы (табл. 1), приведены в табл. 2. Использованные для тестового расчета данные были приняты с учетом рекомендаций [10, 12-14].

На рис. 7 показаны кинетические кривые изменения вероятностей безотказной и исправной работы канатной системы в течение заданного срока эксплуатации мобильного транспортно-перегрузочного комплекса, а на рис. 8 – ее отдельных структурных подсистем.

Наличие в составе канатной системы в целом большого числа структурных элементов, вызывающих критические отказы, а также достаточно большие значения интенсивности отказов отдельных из них обуславливают более низкие показатели надежности для безотказной работы. Применительно к





анализу отдельных подсистем такая тенденция не проявляется, так как для каждой из них характерно собственное соотношение

структурных элементов, вызывающих критические и некритические отказы.

Таблица 2 Интенсивность отказов структурных элементов канатной системы

Номер	Интенсивность отказа $\lambda_m \cdot 10^6$ , ч <sup>-1</sup>	Номер	Интенсивность отказа $\lambda_m \cdot 10^6$ , ч <sup>-1</sup>	Номер	Интенсивность отказа $\lambda_m \cdot 10^6$ , ч <sup>-1</sup>					
Гидравлический привод механизмов движения канатной системы										
h1,1	3,3	h1,12	0,1	h2,4	0,02					
h1,2	1,45	h1,13; h1,14	0,2	h2,5	0,1					
h1,3; h1,4	0,005	h1,15	0,06	h2,6; h2,7	0,1					
h1,5	0,48	h1,16	0,157	h2,8	0,056					
h1,6	2,24	h1,17	0,056	h2,9	30,0					
h1,7	0,045	h2,1	1,33							
<i>h</i> 1,8 - <i>h</i> 1,11	1,12	h2,2;h2,3	3,2							
	Механический при	вод механиз	зма движения несуи	це-тягового	каната					
m1,1	0,01	m1,5	0,011	m1,9	0,07					
m1,2	1,5	m1,6	1,7	m1,10	0,3					
m1,3	1,0	m1,7	0,06							
m1,4	1,5	m1,8	0,02							
Информационно-управляющая система										
e1,1	0,4	e1,10	1,4	e2,7	1,4					
e1,2	0,02	e1,11	1,4	e2,8;e2,9	1,4					
e1,3	0,01	e1,12	1,5	e2,10 - e2,13	0,5					
e1,4 - e1,7	0,42	e2,1-e2,4	1,41	e2,14	1,7					
e1,8; e1,9	1,4	e2,5; e2,6	1,0	e2,15	0,52					

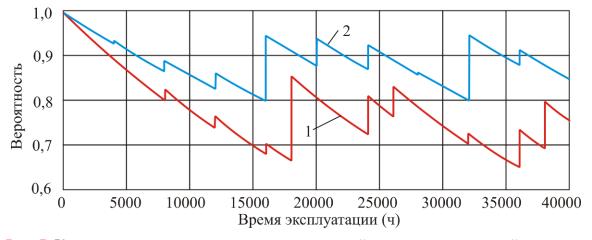


Рис. 7. Кинетические кривые изменения показателей надежности канатной системы: 1 - вероятность безотказной работы; 2 - вероятность исправной работы





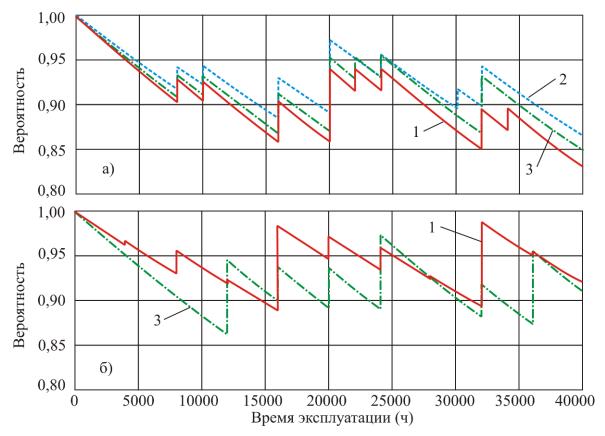


Рис. 8. Кинетические кривые изменения показателей надежности подсистем канатной системы: а - вероятность безотказной работы; б - вероятность исправной работы (1 – гидравлическая; 2 – механическая; 3 - информационно-управляющая)

#### 6. Заключение

Применение представленной математической модели может оказаться достаточно эффективным на стадии проектирования канатной системы мобильного транспортноперегрузочного канатного комплекса. Компьютерное прогнозирование кинетики показателей надежности позволяет ответить на ряд важных технико-экономических вопросов, связанных с дальнейшей эксплуатацией спроектированной машины, а именно:

1) оценить максимальное снижение вероятности безотказной работы в течение заданного срока службы мобильного комплекса при заданном графике проведения плановых ремонтов;

### Список литературы

1. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В., Таричко В.И. Транспортно-логистические технологии и машины для цифровой урбанизированной среды. Ростов-на-Дону: ДГТУ,

- 2) оценить влияние периодичности плановых ремонтов на снижение показателей надежности канатной системы и ее отдельных подсистем с целью обеспечения требуемого уровня вероятности безотказной работы:
- 3) определить для каждого планового ремонта объем необходимых восстановительных работ и перечень подлежащих восстановлению структурных элементов канатной системы, приводящих к критическим отказам;
- 4) получить исходные данные для расчета и оптимизации технического риска эксплуатации канатной системы в соответствии с известными подходами [15-18].

## References

1. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V., Tarichko V.I. *Transportno-logisticheskie tekhnologii i mashiny dlya tsifrovoy urbanizirovannoy sredy* [Transport and logistics technologies and ma-





2019. 268 c.

DOI: http://doi.org/10.5281/zenodo.3551132

- 2. Таричко В.И., Химич А.В. Комплексная математическая модель мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 523-532. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-523-532
- 3. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. 344 с.

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913

- 4. Макурин А.Н., Обрядин В.П. К вопросу об использовании мобильных воздушных канатных дорог для аварийноспасательных работ // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 4. С. 73-77.
- 5. Beňo P., Krilek J., Kováč J., Kozak D., Fragassa C. The Analysis of the New Conception Transportation Cableway System Based on the Tractor Equipment // FME Transactions. 2018. Vol. 46. P. 17-22.
- 6. Težak S, Toš Z. Reliability analysis of operation for cableways by FTA (fault tree analysis) method // Promet-Traffic & Transportation. 2000. Vol. 22. P. 163–173. DOI: https://doi.org/10.7307/ptt.v22i3.272
- 7. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов. М.: Наука, 1996. 400 с.
- 8. Анцев В.Ю., Витчук П.В., Крылов К.Ю. Классификация дефектов и отказов грузоподъемных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 10. С. 121-128.
- 9. Лагерева Е.А., Лагерев А.В., Лагерев И.А. Вероятностная оценка надежности гидропривода кранов-манипуляторов путем имитационного моделирования потока отказов элементов // Приводы и компоненты машин. 2012. № 2-3. С. 2-5.
- 10. Лагерев А.В., Аверченков В.И., Лагерева Е.А. Прогнозирование кинетики показателей надежности гидроприводов подъемно-транспортной техники на основе имитационного моделирования потока от-

chines for the digital urban environment]. Rostov-on-Don, Don State Technical University, 2019. 268 p.

DOI: http://doi.org/10.5281/zenodo.3551132

- 2. Tarichko V.I., Khimich A.V. Comprehensive model of the mobile transport and overloading rope complex. *Nauchnotekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 523-532. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-523-532 (In Russian)
- 3. 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. ISBN 978-5-7890-1378-6

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913

- 4. Makurin A.N., Obryadin V.P. K voprosu ob ispolzovanii mobilnykh vozdushnykh kanatnykh dorog dlya avariyno-spasatelnykh rabot (On the use of mobile aerial ropeways for rescue operations). *Nauchnye i obrazovatelnye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2015, No. 4, pp. 73-77. (In Russian)
- 5. Beňo P., Krilek J., Kováč J., Kozak D., Fragassa C. The Analysis of the New Conception Transportation Cableway System Based on the Tractor Equipment. *FME Transactions*, 2018, Vol. 46, pp. 17-22.
- 6. Težak S, Toš Z (2010) Reliability analysis of operation for cableways by FTA (fault tree analysis) method. Promet-Traffic & Transportation 22: 163–173.

DOI: https://doi.org/10.7307/ptt.v22i3.272

- 7. Venttsel A.D. *Kurs teorii sluchaynykh protsessov* [Random Theory Course]. Moscow, Nauka, 1996. 400 p. (In Russian)
- 8. Antsev V.Yu., Vitchuk P.V., Krylov K.Yu. Classification of defects and failure of lifting machines. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta*. *Tekhnicheskie nauki*, 2015, No.10, pp. 121-128. (In Russian)
- 9. Lagereva E.A., Lagerev A.V., Lagerev I.A. Probabilistic estimation of reliability of the hydraulic drive of crane-manipulators simulation-based flow of element failures.





казов элементов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2012. № 2 (34). С. 8-16.

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.1302021

- 11. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Моделирование режимов работы гидроприводов с частотно-дроссельным регулированием мобильных транспортноперегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 462-480. DOI: https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480
- 12. Denson W., Chandler G., Crowell W., Wanner R. Nonelectronic Parts Reliability Data. Chicago: IIT Research Institute, 1991. 632 p.
- 13. Сырицин Т.А. Эксплуатация и надежность гидро- и пневмоприводов. М.: Машиностроение, 1990. 248 с.
- 14. Интенсивность отказов элементов: справочник [Электронный ресурс]. URL: https://areliability.com/intensivnost-otkazov-elementov-spravochnik/ (дата обращения 15.03.2020).
- 15. Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков. М.: Академия, 2008.
- 16. Котельников В.С., Короткий А.А., Павленко А.Н., Еремин И.И. Диагностика и риск-анализ металлических конструкций грузоподъемных кранов. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2006. 315 с.
- 17. 10. ГОСТ Р 54124-2010 Безопасность машин и оборудования. Оценка риска. Дата введения 2012-06-01. М.: Стандартинформ, 2013.
- 18. Лагерев А.В., Лагерева Е.А. Оптимальное управление техническим риском при проектировании гидропривода грузоподъемных машин // Известия МГТУ «МАМИ». 2015. Т.1. № 3 (25). С. 60-66.

- *Pryvody i komponenty mashin*, 2012, No.2-3, pp. 2-5. (In Russian)
- 10. Lagerev A.V., Averchenkov V.I., Lagereva E.A. Prediction of kinetics of dependability indices hydraulic drive of load-haul-dump machines simulation-based flow of element failures. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No.2, pp. 8-16.
- DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.1302021 (In Russian)
- 11. 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-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 462-480.
- DOI: https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480 (In Russian)
- 12. Denson W., Chandler G., Crowell W., Wanner R. Nonelectronic Parts Reliability Data. Chicago: IIT Research Institute, 1991. 632 p.
- 13. Syritsyn T.A. Ekspluatatsiya i nadezhnost gidro- i pnevmoprivodov [Operation and reliability of hydraulic and pneumatic drives]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. 248 p. (In Russian)
- 14. 1. Intensivnost otkazov elementov: spravochnik [Element Failure Rate: Reference]. Available at: https://areliability.com/intensivnost-otkazov-elementov-spravochnik/
- 15. Vishnyakov Ya.D., Radaev N.N. *Obshchaya teoriya riskov* [General theory of risks]. Moscow, Akademiya, 2008. 368 p. (In Russian)
- 16. Kotelnikov V.S., Korotkiy A.A., Pavlenko A.N., Eremin I.I. *Diagnostika i risk-analiz metallicheskikh konstruktsiy gruzopodemnykh kranov* [Diagnostics and risk analysis of metal structures of hoisting cranes]. Novocherkassk, YuRGTU (NPI), 2006. 315 p. (In Russian)
- 17. GOST R 54124-2010 Safety of machinery and equipment. Risk assessment. Moscow, Standartinform, 2015. (In Russian)
- 18. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Optimal management of technical risk the design of the hydraulic lifting machines drive. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2015, Vol.1, No.3, pp. 60-66.

