

УДК (UDC) 62-82:681.581.5

ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАНАТНОЙ СИСТЕМЫ
МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСА
В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИFORMATION OF THE STRATEGY FOR RESTORING THE ROPE SYSTEM OF THE
MOBILE TRANSPORT AND RELOADING ROPE COMPLEX DURING OPERATIONЛагерев И.А.¹, Таричко В.И.², Лагерев А.В.¹
Lagerev I.A.¹, Tarichko V.I.², Lagerev A.V.¹¹ - Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)² - АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)¹ - Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)² - Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассматривается разработка на стадии проектирования мобильных канатных комплексов методики формирования эффективной технико-экономической стратегии восстановления критически опасных структурных элементов канатной системы во время плановых ремонтов. Методика базируется на прогнозировании кинетики вероятности безотказной работы канатной системы в целом в течение всего срока ее эксплуатации, исходя из прогнозирования безотказной работы тех структурных элементов системы, отказ которых приводит к аварийному нарушению работы мобильного канатного комплекса. Моделирование включает интегрирование системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, модифицированной в связи с необходимостью дискретного изменения вероятности безотказной работы элементов, подлежащих замене в моменты времени проведения плановых ремонтов. В качестве технико-экономического критерия эффективности стратегии восстановления канатной системы принято условие получения минимально возможной суммарной стоимости ремонтов канатной системы в течение всего срока ее эксплуатации при обеспечении среднего значения вероятности безотказной работы в течение всего срока эксплуатации, нормируемого в техническом задании на проектирование мобильного канатного комплекса. Формирование указанной стратегии включает планирование графиков проведения, числа, моментов времени, объемов и стоимости плановых ремонтно-восстановительных мероприятий канатной системы. Дано описание компьютерной программы, которая реализует разработанную методику восстановления работоспособности канатной системы. Представлены результаты тестового примера расчета применительно к конкретному проектируемому мобильному канатному комплексу.

Ключевые слова: мобильный канатный комплекс, канатная система, планирование ремонта, стоимость ремонта.

The article discusses the development at the design stage of mobile rope complexes of a methodology for the formation of an effective technical and economic strategy for the restoration of critical structural elements of the rope system during scheduled repairs. The technique is based on predicting the kinetics of the probability of failure of the rope system as a whole during its entire life, based on predicting the failure operation of those structural elements of the system whose failure leads to an emergency malfunction of the mobile rope complex. Modeling includes the integration of the Kolmogorov-Chapman system of differential equations, modified due to the need for a discrete change in the probability of failure-free operation of elements to be replaced at the time of scheduled repairs. As a technical and economic criterion for the effectiveness of the rope system recovery strategy, the condition for obtaining the lowest possible total cost of repairs of the rope system throughout the entire period of its operation, while ensuring the average probability of failure-free operation during the entire period of operation was adopted. The formation of this strategy includes planning the schedules, number, time points, volumes and cost of planned repair and restoration measures of the rope system. A description is given of a computer program that implements the developed technique for restoring the operability of a rope system. The results of a test example of calculation in relation to a specific designed mobile rope complex are presented.

Keywords: mobile rope complex, rope system, repair planning, repair costs.

Дата принятия к публикации: 15.04.2020 † Date of acceptance for publication: 15.04.2020
Дата публикации: 25.06.2020 † Date of publication: 25.06.2020

Сведения об авторах:

Лагереv 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

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

Лагереv 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

Authors' information:

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

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

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

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, реализующие принципы работы грузовых подвесных канатных дорог на принципиально иной базе – специальных колесных или гусеничных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, являются перспективным направлением развития быстроразвертываемого технологического оборудования для эксплуатации в сложных условиях – на неподготовленных и труднодоступных территориях или территориях, подвергшихся деструктивному воздействию природных или техногенных факторов [1, 2].

Основным конструктивным узлом мобильных канатных комплексов, определяющим их функциональное назначение и основные технические характеристики, является канатная система. Конструктивно она состоит из трех взаимосвязанных подсистем [3]:

- гидравлической (формирует гидропривод механизмов движения канатной системы, включая механизм движения несущего тягового каната, механизм установки конце-

вой опоры в рабочее положение и механизм ориентации канатного шкива);

- механической (обеспечивающей передачу и преобразование вращательного движения и крутящего момента на выходном валу гидромотора в линейное перемещение и тяговое усилие несущего-тягового каната);

- информационно-управляющей подсистемы (обеспечивает 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).

Указанные подсистемы включают достаточно большое число конструктивных элементов, подверженных отказам [1], являющимся случайными событиями с соответствующими законами распределения моментов времени их возникновения [4-6]. Для части конструктивных элементов канатной системы нарушение их работоспособности приводит к формированию критических отказов, т.е. таких отказов, которые приводят к поте-

ре работоспособности канатной системы (ее переходу в неработоспособное состояние) в целом. Для других конструктивных элементов, отказ которых расценивается как критический, нарушение их работоспособности не способно приводить к потере работоспособности канатной системы в целом.

Эффективным инструментом прогнозирования изменения количественных показателей надежности в течение времени эксплуатации сложных технических устройств и систем является подход [7] на основе использования [8], отражающей возможные (с точки зрения надежности) состояния, в которых может находиться исследуемый объект, и возможные переходы между ними. Как показано в [9], указанный подход целесообразно использовать для планирования ремонтов машин и сложного технологического оборудования: определения моментов времени проведения ремонтно-восстановительных операций, их объема, стоимости, потребного наименования и числа запасных частей.

В [10, 11] подход на основе использования системы уравнений Колмогорова-Чепмена был реализован при построении математической модели кинетики надежности гидропривода кранов-манипуляторов и оптимального управления техническим риском при проектировании гидропривода грузоподъемных машин. В [10] также была разработана методика определения на стадии проектирования кранов-манипуляторов мобильных транспортно-технологических машин графиков и объемов ремонта их гидроприводов. Позже указанный подход был развит в [3] применительно к моделированию кинетики показателей надежности канатной системы мобильных транспортно-перевозочных канатных комплексов.

2. Постановка задачи

Сложные условия эксплуатации могут являться не только причиной ускоренного снижения количественных показателей работоспособного состояния канатных систем мобильных канатных комплексов по сравнению с условиями работы грузовых или пассажирских подвесных канатных дорог, но

они также объективно усложняют проведение необходимых ремонтно-восстановительных мероприятий в неподготовленных полевых условиях. Несмотря на проведение плановых ремонтов и технических обслуживаний, которые приурочиваются к моментам времени нахождения мобильных канатных комплексов в режиме ожидания в местах их постоянной дислокации, в условиях эксплуатации могут происходить случайные критические отказы структурных элементов канатных систем. Их возникновение требует немедленной остановки работы мобильного транспортно-перевозочного канатного комплекса и проведения мероприятий по внеплановому восстановлению работоспособного состояния аварийного канатного комплекса в полевых условиях. Очевидно, такая ситуация оказывается весьма нежелательной как с точки зрения перерыва в выполнении транспортно-перевозочных операций в условиях возможного дефицита времени, так и усложнения проведения ремонтно-восстановительных операций по сравнению с проведением ремонта специализированными эксплуатационно-ремонтными службами в стационарных условиях. Очевидно, целесообразным выходом из указанной ситуации является эффективная стратегия проведения ремонтно-восстановительных мероприятий конструктивных элементов канатной системы мобильных канатных комплексов. Ее формирование является актуальной инженерной задачей, имеющей технико-экономический характер.

Одним из возможных подходов к снижению негативных последствий случайных критических отказов конструктивных элементов канатной системы в условиях эксплуатации и, таким образом, к формированию эффективной стратегии их восстановления является упреждающая замена во время планового ремонта в стационарных условиях тех элементов, у которых вероятность потери работоспособного состояния достигает к моменту такого ремонта определенного, заданного на этапе проектирования предельно допустимого значения вероятности критического отказа [3].

В рамках данного исследования разработан метод технико-экономического оптимального планирования на стадии проектирования мобильных канатных комплексов графиков проведения, числа, объемов и стоимости плановых ремонтно-восстановительных операций канатной системы.

3. Анализ взаимосвязи показателей кинетики надежности канатной системы с характеристиками графиков плановых ремонтов

Для данного анализа была использована математическая модель и реализующая ее

компьютерная программа «Моделирование кинетики показателей надежности механизма движения канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса», разработанные в [3]. Использованная для анализа обобщенная структурная схема канатной системы, включающая структурные схемы ее подсистем (гидравлической, механической и информационно-управляющей) приведена на рис. 1. Обозначения элементов обобщенной структурной схемы и используемая далее в расчетных зависимостях нумерация элементов, приводящих к критическим отказам, приведены в подрисуночной надписи к рис. 1.

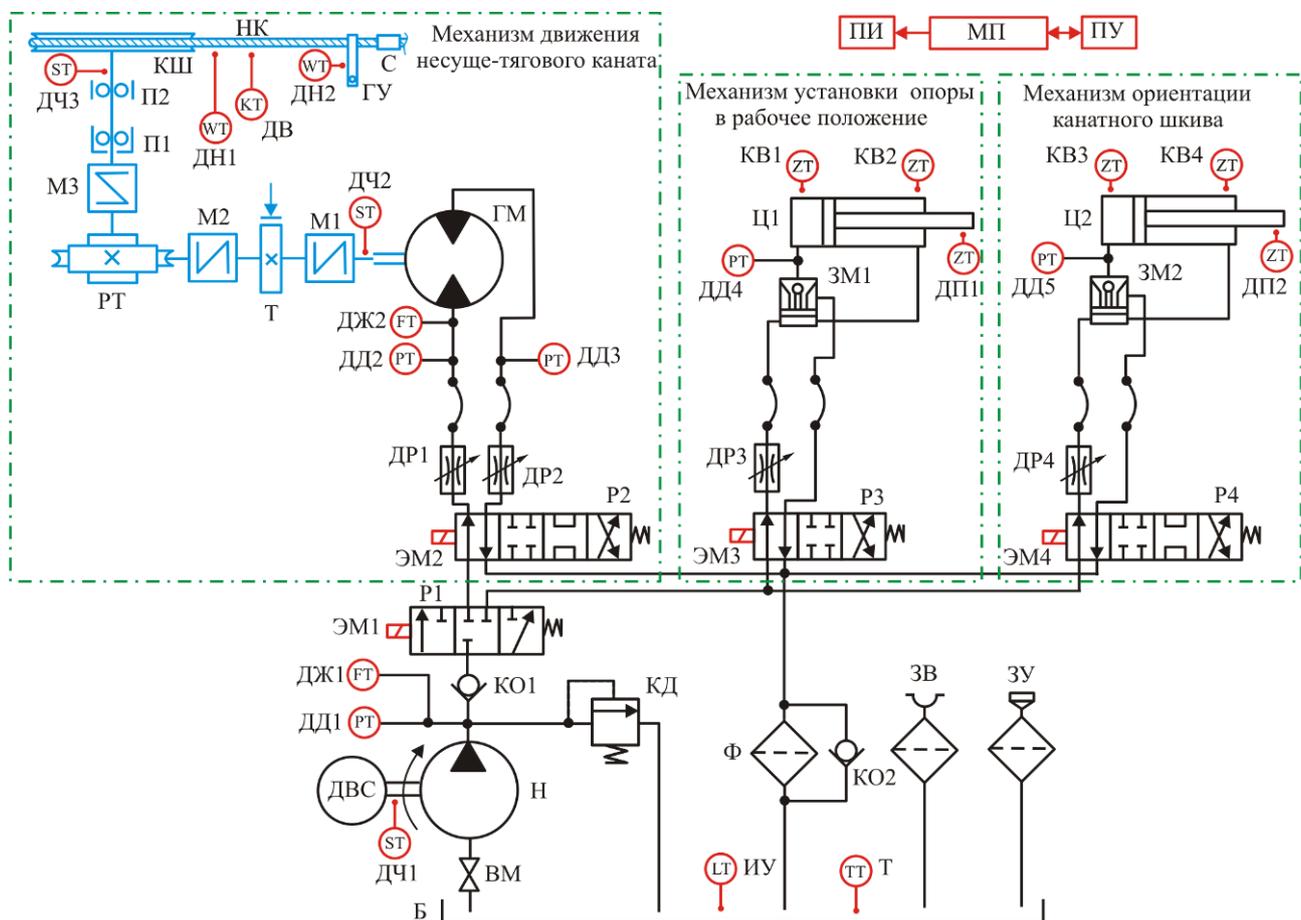


Рис. 1. Используемая для анализа обобщенная структурная схема канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса [3]

(Элементы, приводящие к критическому отказу: Н (h1,1) - объемный нерегулируемый насос; ГМ (h1,2) - гидромотор механизма движения несущего-тягового каната; Ц1 (h1,3) - поршневой гидроцилиндр двухстороннего действия с односторонним штоком механизма установки опоры в рабочее положение; Ц2 (h1,4) - поршневой гидроцилиндр двухстороннего действия с односторонним штоком механизма ориентации канатного шкива; Б (h1,5) - гидробак для работы под атмосферным давлением; КД (h1,6) - предохранительный клапан прямого действия; Ф (h1,7) - сливной фильтр; П1 (h1,8) - входной

гидрораспределитель; P2 (h1,9) - гидрораспределитель механизма движения несущего-тягового каната; P3 (h1,10) - гидрораспределитель механизма установки опоры в рабочее положение; P4 (h1,11) - гидрораспределитель механизма ориентации канатного шкива; ДР1 (h1,12), ДР2 (h1,13) - регулируемые дроссели механизма движения несущего-тягового каната; ЗМ1 (h1,14) - односторонний гидрозамок фиксации опоры в рабочем положении; ЗМ2 (h1,15) - односторонний гидрозамок фиксации канатного шкива; (h1,16) - гидролинии (металлические трубопроводы); h1,17 - гидролинии (гибкие рукава); h1,18 - устройства соединения гидролиний – частично; КШ (m1,1) - канатный шкив; НК (m1,2) - несущий-тяговый стальной канат; ГУ (m1,3) - грузозахватное устройство для подвешивания груза; С (m1,4) - счалочное устройство; РТ (m1,5) - редуктор червячный или планетарный; Т (m1,6) - тормоз; М1, М2, М3 (m1,7) - упругие соединительные муфты; П1 (m1,8) – упорно-радиальный сферический роликоподшипник; П2 (m1,9) - радиальный сферический шарикоподшипник; (m1,10) - передаточные валы; МП (e1,1) - управляющий микропроцессор; ПУ (e1,2) - панель управления работой канатной системы; ПИ (e1,3) - панель информации о количественных параметрах текущего состояния исполнительных подсистем канатной системы; ЭМ1 (e1,4) - электромагнит управления входным гидрораспределителем; ЭМ2 (e1,5) - электромагнит управления гидрораспределителем механизма движения несущего-тягового каната; ЭМ3 (e1,6) - электромагнит управления гидрораспределителем механизма установки опоры в рабочее положение; ЭМ4 (e1,7) - электромагнит управления гидрораспределителем механизма ориентации канатного шкива; ДЧ1 (e1,8) - датчик частоты вращения входного вала насоса; ДЧ3 (e1,9) - датчик частоты вращения вала канатного шкива; ДН1 (e1,10) - датчик натяжения несущего-тягового каната; ДН2 (e1,11) - датчик веса транспортируемого груза; ДВ (e1,12) - датчик отсчета времени движения несущего-тягового каната.

Элементы, приводящие к некритическому отказу: ВМ - входной вентиль; КО1 - обратный клапан в напорной гидролинии; КО2 - обратный клапан в сливной гидролинии; ЗУ - заливное устройство; ЗВ - воздухозаборное устройство с фильтром; ДР3 - регулируемый дроссель механизма установки опоры в рабочее положение; ДР4 - регулируемый дроссель механизма ориентации канатного шкива; ДД1 - датчик давления на выходе насоса; ДД2, ДД3 - датчики давления в подводящих гидролиниях гидромотора; ДД4 - датчик давления на входе гидроцилиндра установки опоры в рабочее положение; ДД5 - датчик давления на входе гидроцилиндра ориентации канатного шкива; ДЖ1 - датчик объемной подачи насоса; ДЖ2 - датчик объемного расхода гидромотора; ДЧ2 - датчик частоты вращения выходного вала гидромотора; ДП1 - датчик углового положения опоры; ДП2 - датчик углового положения канатного шкива; КВ1 - концевой выключатель для крайнего нижнего положения опоры; КВ2 - концевой выключатель для крайнего верхнего положения опоры; КВ3 – концевой выключатель для крайнего нижнего положения канатного шкива; КВ4 - концевой выключатель для крайнего верхнего положения канатного шкива; ИУ - измеритель уровня жидкости в гидробаке; Т - датчик температуры жидкости в гидробаке)

В ходе дальнейшего анализа учитывались только те структурные элементы, которые приводят к критическим отказам. Считалось, что восстановление элементов, приводящих к некритическим отказам, производится во время плановых ремонтов в соответствии с периодичностью, установленной эксплуатационной документацией, и не влияет на работоспособность канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса при его непосредственной работе.

Как было предложено в [3], критерием необходимости восстановления или замены потенциально опасного элемента в момент времени $\tau_{r,i}$ проведения планового i -го ремонта является достижение произвольным m -м элементом v -й подсистемы предельно допустимого значения вероятности отказа $[P_{v,m}]$:

$$P_{v,m}(\tau_{r,i}) \geq [P_{v,m}].$$

В общем случае величины $[P_{v,m}]$ могут быть индивидуальны для разных структурных элементов канатной системы. Можно предполагать, что их меньшие значения должны соответствовать наиболее ответственным и дорогостоящим элементам, критический отказ которых способен привести к большому 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 повышению стоимости единичного i -го ремонта $c_{rp,i}$ и суммарной стоимости всех ремонтов C_r в течение заданного срока эксплуатации мо-

бильного канатного комплекса. Однако в этом случае следует ожидать повышение уровня надежности при эксплуатации и снижение уровня технического риска канатной системы. В противном случае, при допущении более высоких значений $[P_{v,m}]$ стоимость ремонтов будет снижаться при одновременном снижении уровня надежности и возрастании уровня технического риска эксплуатации канатной системы.

Поэтому первостепенной инженерной задачей, которую необходимо решить при формировании эффективной стратегии ремонта канатной системы, является взаимная увязка как технического аспекта данной задачи, т.е. обеспечение приемлемо высокого уровня надежности и технического риска, так и ее экономического аспекта – обеспечения приемлемо низкого уровня суммарной стоимости и числа ремонтов в течение всего заданного срока эксплуатации мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса.

Анализ математической модели [3] позволяет сделать вывод, что исходными факторами, определяющими эффективность стратегии ремонтов канатной системы при неизменном наборе ее структурных элементов и подлежащими рассмотрению, являются два фактора:

- общее число плановых ремонтов N_{rp} в течение заданного срока эксплуатации T_{op} ;
- предельно допустимое значение вероятности критического отказа $[P_{v,m}]$.

При рассмотрении этих факторов были введены следующие допущения:

- в течение срока эксплуатации T_{op} моменты времени проведения плановых ремонтов $\tau_{r,i}$ распределены равномерно с периодичностью $\Delta T_{op} = T_{op} / N_{rp}$;
- все критически опасные структурные элементы канатной системы имеют одинаковое значение предельно допустимой вероятности критического отказа $[P_{v,m}] = [P]$.

Приведенные в [3] кинетические кривые изменения показателей надежности канатной системы в течение срока эксплуатации сви-

детельствуют о том, что эти показатели и, в частности, характеризующая работоспособность данного объекта вероятность безотказной работы $P_0(\tau)$, переменны во времени, причем графически кинетические кривые имеют пилообразную форму с резкими скачками в моменты проведения плановых ремонтов.

Поэтому в качестве исследуемых факторов, количественно характеризующих эффективность стратегии ремонтов канатной системы и подлежащих определению, целесообразно использовать следующие технические и экономические факторы:

- минимальное значение вероятности безотказной работы в течение всего срока эксплуатации канатной системы

$$(P_0)_{\min} = \min_{0 \leq \tau \leq T_{op}} [P_0(\tau)];$$

- среднее значение вероятности безотказной работы в течение всего срока эксплуатации канатной системы

$$(P_0)_{av} = T_{op}^{-1} \int_0^{T_{op}} P_0(\tau) d\tau; \quad (1)$$

- суммарная стоимость ремонтов канатной системы в течение всего срока ее эксплуатации

$$C_{rp} = \sum_{i=1}^{i=N_{rp}} c_{rp,i}; \quad (2)$$

- относительная суммарная стоимость ремонтов канатной системы в течение всего срока ее эксплуатации

$$\bar{C}_{rp} = C_{rp} / C_{1set}, \quad (3)$$

где $\min_{\Delta B}(A)$ - операция поиска минимального значения параметра A на интервале ΔB ; C_{1set} - стоимость одного комплекта потенциально опасных структурных элементов канатной системы.

Оценку экономических факторов C_{rp} и \bar{C}_{rp} можно выполнять как в абсолютных, так и относительных (условных) единицах стоимости, однако при этом важно соблюсти правильное соотношение между стоимостями отдельных структурных элементов.

На рис. 2 приведены графики изменения вероятности безотказной работы канатной

системы $P_0(\tau)$ в течение заданного срока эксплуатации $T_{op} = 40000$ ч в зависимости от принятого значения предельно допустимой вероятности критического отказа $[P]$ и числа ремонтов N_{rp} . Эти графики свидетельствуют о существенном и неоднородном влиянии исходных факторов на кинетику количественных показателей надежности канатной системы. В целом, наблюдается тенденция, что уменьшение N_{rp} и увеличение $[P]$ обу-

славливают повышение неоднородности графиков $P_0(\tau)$ и расширение диапазона значений, в пределах которого происходят колебания вероятности безотказной работы. Однако при равных значениях $[P]$ наибольший диапазон колебаний $P_0(\tau)$ характерен для промежуточных значений N_{rp} : по данным рис. 2 он максимален при $N_{rp} = 10$ и снижается для $N_{rp} = 5$ и $N_{rp} = 20$.

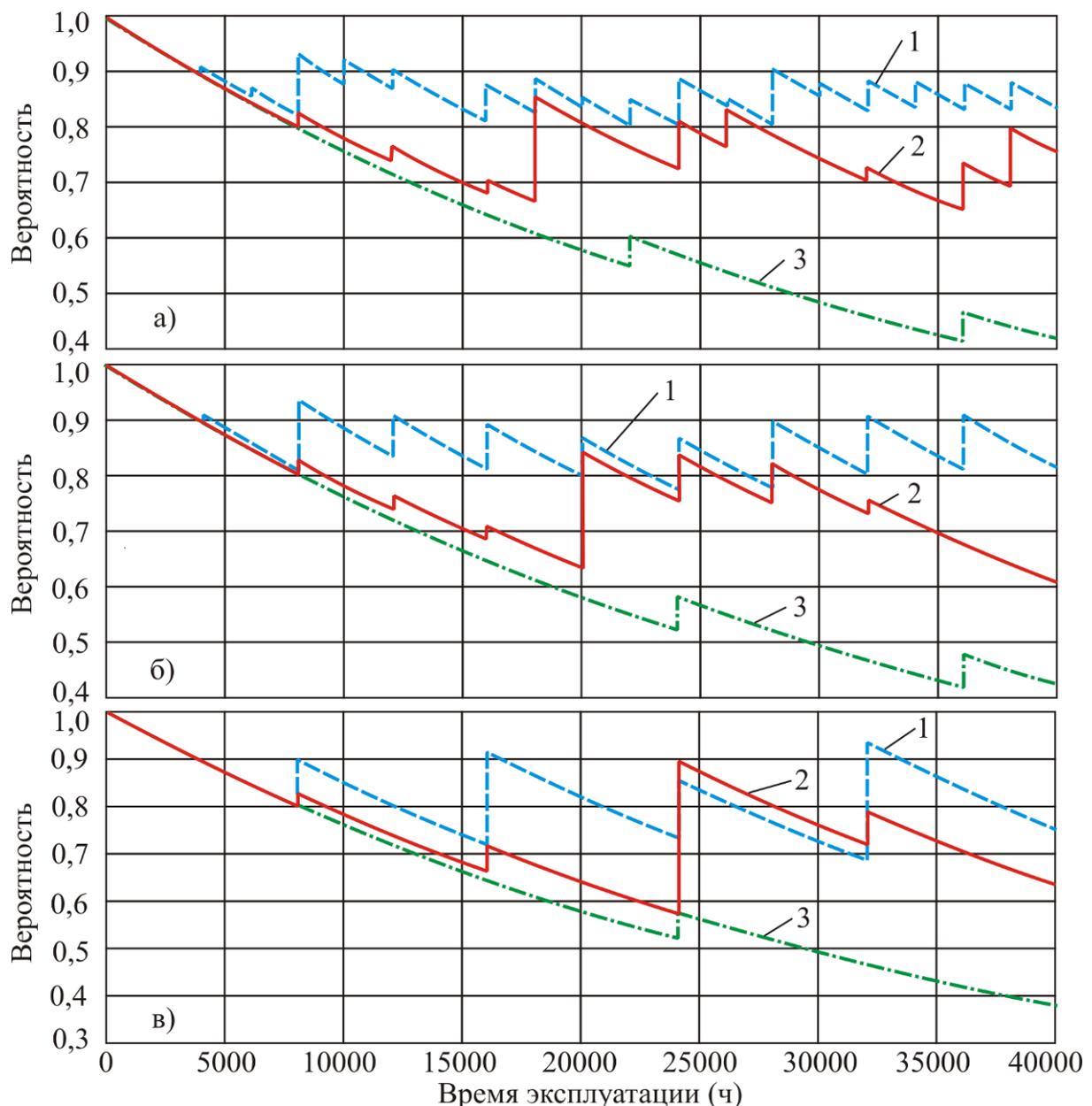


Рис. 2. Изменение вероятности безотказной работы канатной системы в течение заданного срока эксплуатации: а - $[P] = 0,01$; б - $[P] = 0,02$; в - $[P] = 0,05$
 (1 - $N_{rp} = 20$; 2 - $N_{rp} = 10$; 3 - $N_{rp} = 5$)

Рис. 3 и 4 дают представление о влиянии принятого значения предельно допустимой вероятности критического отказа $[P]$ и числа ремонтов N_{rp} на характеристики различных стратегий ремонта канатной системы - минимальное $(P_0)_{\min}$ и среднее $(P_0)_{av}$ значения вероятности безотказной работы, суммарную стоимость ремонтов C_{rp} . Анализ графиков на этих рисунках показывает, что четко прослеживается тенденция снижения количественных значений рассмотренных характеристик с увеличением предельно допустимой вероятности критического отказа $[P]$. Однако графики, соответствующие различным числам ремонтов N_{rp} , могут пересекаться.

Графики $(P_0)_{\min}$ и $(P_0)_{av}$ (рис. 4, а, б), соответствующие значению $[P] = 0$, не имеют практического значения, так как предусматривают полную замену всех критически

опасных структурных элементов при каждом плановом ремонте, что является чрезмерно затратным и нереальным. Однако они служат ориентиром того, какие максимальные значения минимальной $(P_0)_{\min}$ и средней $(P_0)_{av}$ вероятности безотказной работы теоретически можно получить при том или ином числе ремонтов канатной системы. Видно, что с увеличением числа ремонтов в стратегии восстановления канатной системы наблюдается некоторый рост величин $(P_0)_{\min}$ и $(P_0)_{av}$. Однако их постоянный рост характерен для малых значений $[P] \leq 0,01 \dots 0,02$. При больших значениях наблюдается практически равные значения $(P_0)_{\min}$ и $(P_0)_{av}$ при числе ремонтов $N_{rp} \geq 4 \dots 8$.

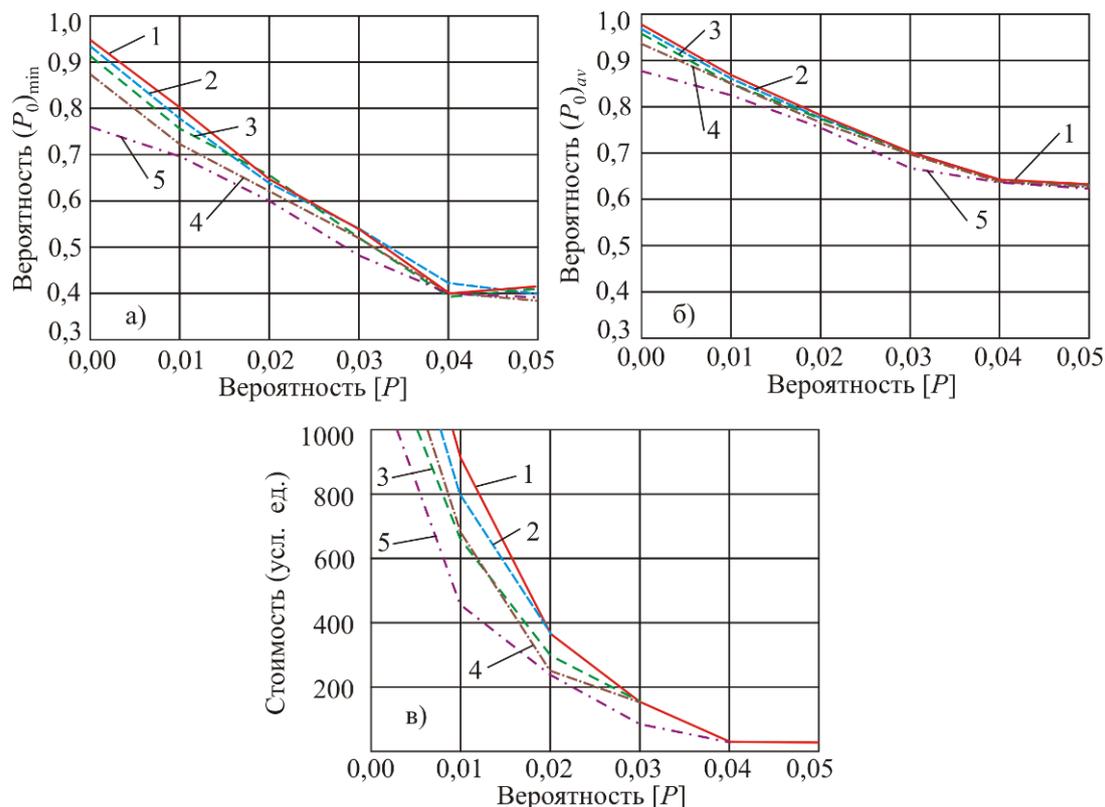


Рис. 3. Характеристики различных стратегий восстановления канатной системы:
а – минимальное значение вероятности безотказной работы за весь срок эксплуатации;
б - среднее значение вероятности безотказной работы за весь срок эксплуатации; в – суммарная стоимость ремонтов (1 - $N_{rp} = 20$; 2 - $N_{rp} = 16$; 3 - $N_{rp} = 12$; 4 - $N_{rp} = 8$; 5 - $N_{rp} = 4$)

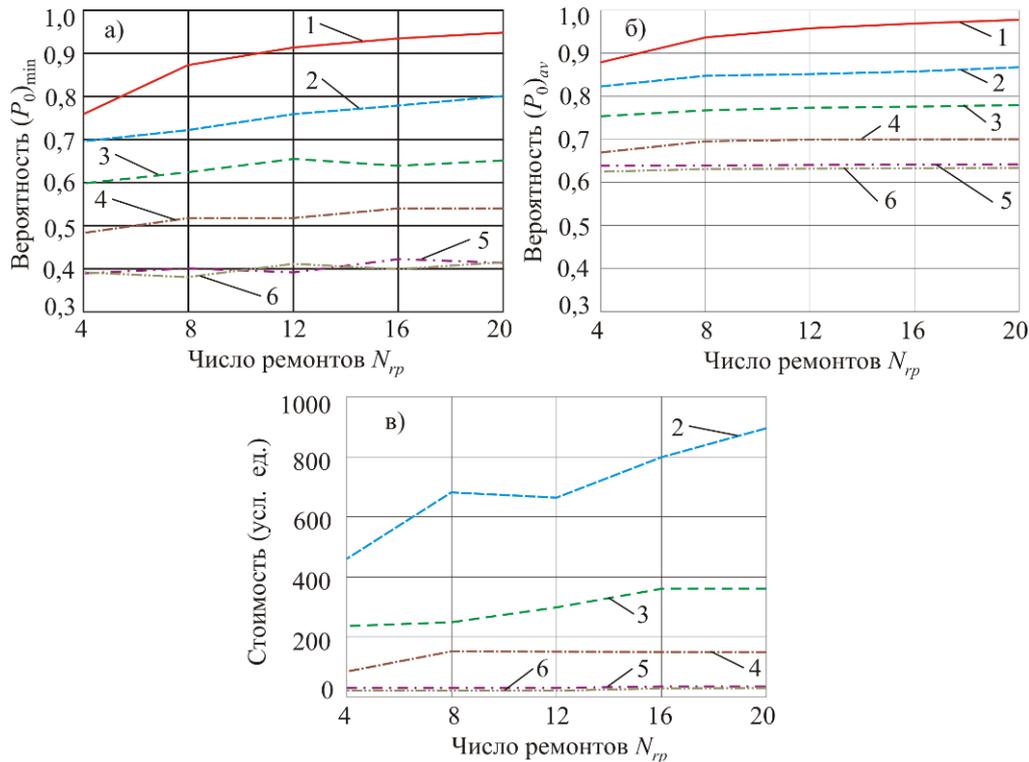


Рис. 4. Характеристики различных стратегий восстановления канатной системы:
 а – минимальное значение вероятности безотказной работы за весь срок эксплуатации;
 б - среднее значение вероятности безотказной работы за весь срок эксплуатации;
 в – суммарная стоимость ремонтов (1 - $[P] = 0$; 2 - $[P] = 0,01$; 3 - $[P] = 0,02$; 4 - $[P] = 0,03$;
 5 - $[P] = 0,04$; $[P] = 0,05$)

На рис. 5 показаны графики $\bar{\tau} = \bar{\tau}(P_0)$, характеризующие относительную продолжительность времени эксплуатации канатной системы $\bar{\tau} = \Delta\tau(P_0)/T_{op}$ с величиной вероятности безотказной работы, превышающей P_0 (т.е. лежащей в интервале $P_0 \dots 1,0$). Точки P_0 на этих графиках, удовлетворяющие условию $\bar{\tau}(P_0) = 1$ (т.е. крайние левые точки графиков), соответствуют минимальным значениям вероятности безотказной работы в течение всего срока эксплуатации канатной системы. Очевидно, та стратегия восстановления работоспособности канатной системы, при которой канатная система большую часть времени эксплуатации работает с повышенными значениями вероятности безотказной работы является более благоприятной. С этой точки зрения график 2 на рис. 5, имеющий более выпуклую форму кривой $\bar{\tau} = \bar{\tau}(P_0)$, более благоприятен, чем график 3.

4. Методика формирования стратегии восстановления канатной системы

В качестве технико-экономического критерия эффективности стратегии восстановления канатной системы принято условие получения минимально возможной суммарной C_{rp} или относительной суммарной \bar{C}_{rp} стоимости ремонтов канатной системы в течение всего срока ее эксплуатации при обеспечении среднего значения вероятности безотказной работы в течение всего срока эксплуатации $[P_{av}]$, нормируемого в техническом задании на проектирование комплекса.

Задание требуемого среднего значения вероятности безотказной работы $(P_0)_{av}$ более предпочтительно, чем нормирование минимального значения вероятности безотказной работы $(P_0)_{\min}$, так как в первом случае обеспечивается приемлемый уровень надежности канатной системы в течение всего сро-

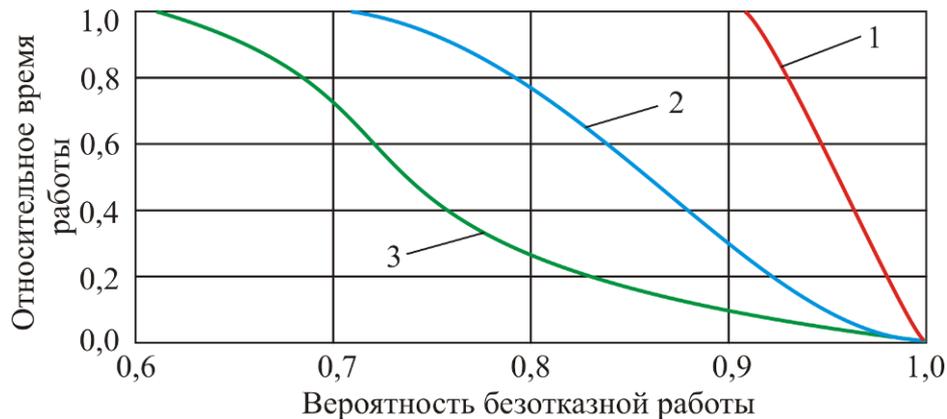


Рис. 5. Относительная продолжительность времени эксплуатации с произвольной вероятностью безотказной работы: 1 - $(P_0)_{av} = 0,95$; 2 - $(P_0)_{av} = 0,85$; 3 - $(P_0)_{av} = 0,75$

ка эксплуатации, а во втором случае – только для локального момента времени.

Формирование стратегии восстановления канатной системы на основе принятого критерия эффективности основано на нахождении наилучшего сочетания двух исходных факторов – числа плановых ремонтов N_{rp} и предельно допустимой вероятности критического отказа $[P]$. Процесс нахождения наилучшего сочетания построен на переборе нескольких значений числа ремонтов N_{rp} из интервала $N_{rp,min} \leq N_{rp} \leq N_{rp,max}$. Для каждого рассматриваемого значения N_{rp} необходимо выполнить следующие расчетные действия.

1. Определение порогового (максимального) значения $[P]$, при котором соблюдается условие

$$(P_0)_{av} = [P_{av}]. \quad (4)$$

Для этого удобно использовать подход [12], основанный на определении средней вероятности безотказной работы $(P_0)_{av}$ в дискретном числе точек $[P]_1, \dots, [P]_K$ в пределах возможного изменения порогового значения $0 \dots [P]_{max} = 0,04 \dots 0,07$, а затем аппроксимировать полученную дискретную функцию с помощью одномерной сплайн-интерполяции вида $(P_0)_{av} = (P_0)_{av}([P])$ (рис. 6).

Одномерная сплайн-интерполяция позволяет аппроксимировать функцию $(P_0)_{av} = (P_0)_{av}([P])$ на каждом k -м участке между соседними опорными дискретными

точками $[P]_k$ и $[P]_{k+1}$ кубическим полиномом вида [13]:

$$(P_0)_{av}([P]) = (P_0)_{av,k} + b_{P,k}([P] - [P]_k) + c_{P,k}([P] - [P]_k)^2 + d_{P,k}([P] - [P]_k)^3,$$

где $[P]_k$ - абсциссы опорных точек сплайн-интерполяции; $(P_0)_{av,k}$ - ординаты опорных точек сплайн-интерполяции.

Искомое пороговое значение $[P]$ определяется решением нелинейного алгебраического уравнения

$$(P_0)_{av,k} + b_{P,k}([P] - [P]_k) + c_{P,k}([P] - [P]_k)^2 + d_{P,k}([P] - [P]_k)^3 - [P_{av}] = 0$$

одним из известных методов численного анализа.

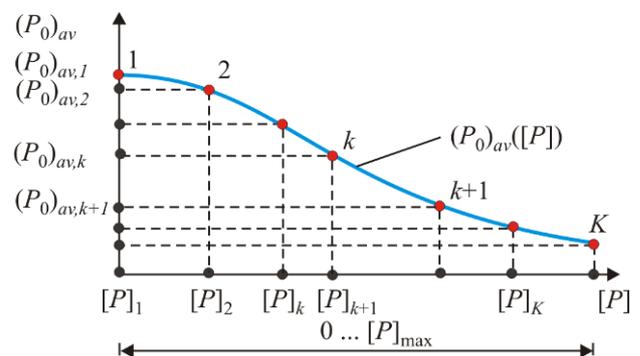


Рис. 6. Сплайн-интерполяция предварительно определенных значений средней вероятности безотказной работы $(P_0)_{av}$ в дискретном числе точек $[P]_1, \dots, [P]_K$

2. Построение кинетической кривой изменения вероятности безотказной работы

канатной системы в течение заданного срока эксплуатации, аналогичной кривым на рис. 2, с помощью изложенного в [3] метода и определение суммарной C_{rp} или относительной суммарной \bar{C}_{rp} стоимости ремонтов по зависимостям (2) и (3).

3. Сравнение характеристик C_{rp} или \bar{C}_{rp} , соответствующих кинетическим кривым $P_0(\tau)$ для разных значений числа плановых ремонтов, и выбор той стратегии, которая имеет наименьшую величину C_{rp} или \bar{C}_{rp} . Такая стратегия восстановления канатной системы является наиболее эффективной, а характеризующее ее сочетание исходных факторов N_{rp} и $[P]$ является наилучшим.

4. Уточняющий расчет наиболее эффективной стратегии восстановления канатной системы. Он необходим в связи с тем, что для определения порогового значения $[P]$ использовалась процедура приближенного представления функции $(P_0)_{av} = (P_0)_{av}([P])$.

В основе уточняющего расчета лежит процедура построения с помощью метода, изложенного в [3], кинетической кривой изменения вероятности безотказной работы $P_0(\tau)$ канатной системы в течение заданного срока эксплуатации при установленном наилучшем сочетании исходных факторов N_{rp} и $[P]$. При этом выполняется определение моментов времени проведения плановых ремонтов $\tau_{rp,i} (1 \leq i \leq N_{rp})$, минимальной $(P_0)_{\min}$ и фактической средней $(P_0)_{av}$ вероятности безотказной работы, суммарной C_{rp} и относительной суммарной \bar{C}_{rp} стоимости всех плановых ремонтов и стоимости отдельных ремонтов $c_{rp,i} (1 \leq i \leq N_{rp})$, а также для каждого планового ремонта определяется перечень критически опасных структурных элементов, подлежащих восстановлению во время каждого планового ремонта.

5. Компьютерная реализация методики

Разработанная методика формирования стратегии восстановления канатной системы

мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса была реализована в виде компьютерного программы «Планирование стратегии ремонтов канатной системы мобильного канатного комплекса».

Структурная схема программы включает в себя главную процедуру `Planning_of_Repairs_of_Rope_System`, 5 процедур типа `Procedure`:

- *Det_DetP* – вычисление правой части уравнений Колмогорова-Чепмена – умножение матрицы на вектор;

- *DetermPoPt* - расчет предельно допустимой вероятности критического отказа $[P]$, обеспечивающей реализацию нормированной средней вероятности безотказной работы в течение всего срока эксплуатации канатной системы $[P_{av}]$;

- *Kinetica* - решение системы уравнений Колмогорова-Чепмена методом Рунге-Кутты IV порядка для произвольного момента времени эксплуатации;

- *MatrixPrs* - построение матрицы системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена для канатной системы при безотказной работе;

- *SplInt* - кубическая сплайн-интерполяция одномерного полинома, заданного набором опорных точек; а также 1 процедуры типа `Function`:

- *AprSpl* - расчет значения функции, заданной кубическим сплайном, в заданной точке.

Результатом выполнения компьютерной программы является формирование эффективной стратегии восстановления канатной системы мобильного транспортно-технологического комплекса, характеризующейся минимальной суммарной стоимостью ремонтно-восстановительных операций за весь срок эксплуатации. В результате расчетом определяются следующие количественные параметры и характеристики стратегии:

- 1) число N_{rp} и моменты времени $\tau_{rp,i} (1 \leq i \leq N_{rp})$ проведения плановых ремонтов;

- 2) значения минимальной $(P_0)_{\min}$, фактической (уточненной) средней $(P_0)_{av}$ и пре-

дельно допустимой $[P]$ вероятности безотказной работы канатной системы в течение всего срока эксплуатации;

3) значения суммарной C_{rp} и относительной суммарной \bar{C}_{rp} стоимости ремонтов канатной системы в течение всего срока ее эксплуатации, стоимости отдельных ремонтов $c_{rp,i}$ ($1 \leq i \leq N_{rp}$);

4) перечень структурных элементов, подлежащих восстановлению во время каждого планового ремонта.

6. Тестовый анализ методики

Тестовая оценка особенностей использования разработанной методики для формирования эффективной стратегии восстановления структурных элементов канатной системы и адекватность получаемых результатов были проведены применительно к конструкции механизма движения мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса протяженностью 200 м с гидравлическим частотно-дрессельным регулированием скорости перемещения груза весом до 100 кН [12]. Заданный срок эксплуатации мобильного канатного комплекса - 40000 ч, число плановых ремонтов варьировалось в интервале 4...20. Расчеты проводились для трех уровней нормированной вероятности

безотказной работы канатной системы $[P_{av}]$: 0,95; 0,85 и 0,75. Значения интенсивности отказов структурных элементов, входящих в конструкцию канатной системы, взяты из работы [3].

На рис. 7 представлены кинетические кривые вероятности безотказной работы канатной системы в течение заданного срока эксплуатации при наиболее эффективных стратегиях восстановления работоспособности канатной системы в зависимости от нормированного значения $[P_{av}]$. В табл. 1 и на рис. 8 приведены значения параметров, характеризующих эти стратегии. Видно (рис. 8, в), что до нормированного значения $[P_{av}] \sim 0,92$ имеет место линейный рост суммарной стоимости ремонтов, а затем он сменяется резко нелинейным ростом. Вследствие этого для рассматриваемой канатной системы при принятой интенсивности отказов и стоимости критически опасных структурных элементов достижение более высокого уровня надежности является, очевидно, экономически неприемлемой задачей. Очевидно, при использовании в составе канатной системы структурных элементов, имеющих другие значения интенсивности отказов, это значение нормированной вероятности $[P_{av}]$ может сдвигаться.

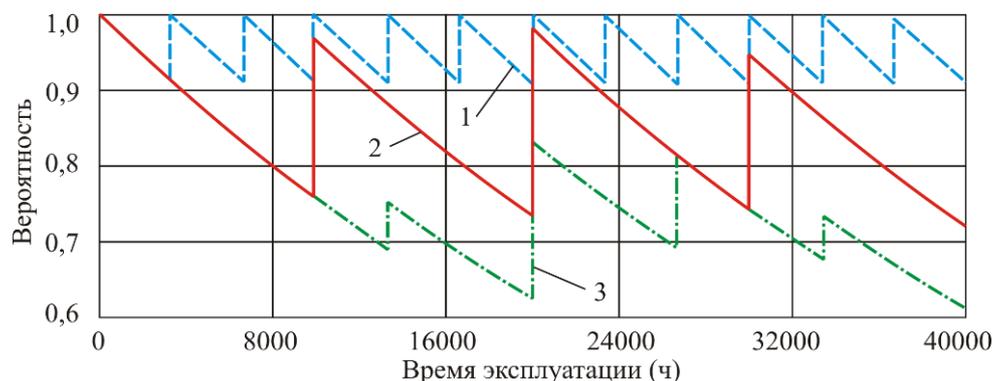


Рис. 7. Изменение вероятности безотказной работы канатной системы в течение заданного срока эксплуатации при наиболее эффективных стратегиях ремонта:

1 - $[P_{av}] = 0,95$; 2 - $[P_{av}] = 0,85$; 3 - $[P_{av}] = 0,75$

В табл. 2 - 4 для трех нормированном значения средней вероятности безотказной работы $[P_{av}] = 0,95$; 0,90 и 0,85 для каждого

критически опасного m -го элемента v -й подсистемы канатной системы показано, к каким моментам времени проведения плано-

вых ремонтов $\tau_{rp,i}$ их вероятность безотказной работы снижается до значения $(P_0)_{m,v}(\tau_{rp,i}) \leq 1 - [P_{av}]$. Во время этих ремонтов соответствующие элементы должны быть восстановлены, что позволяет для каж-

дого i -го планового ремонта составить перечень восстанавливаемых элементов, оценить объем и стоимость i -го ремонта, а также сформировать заявку на потребность в запасных частях.

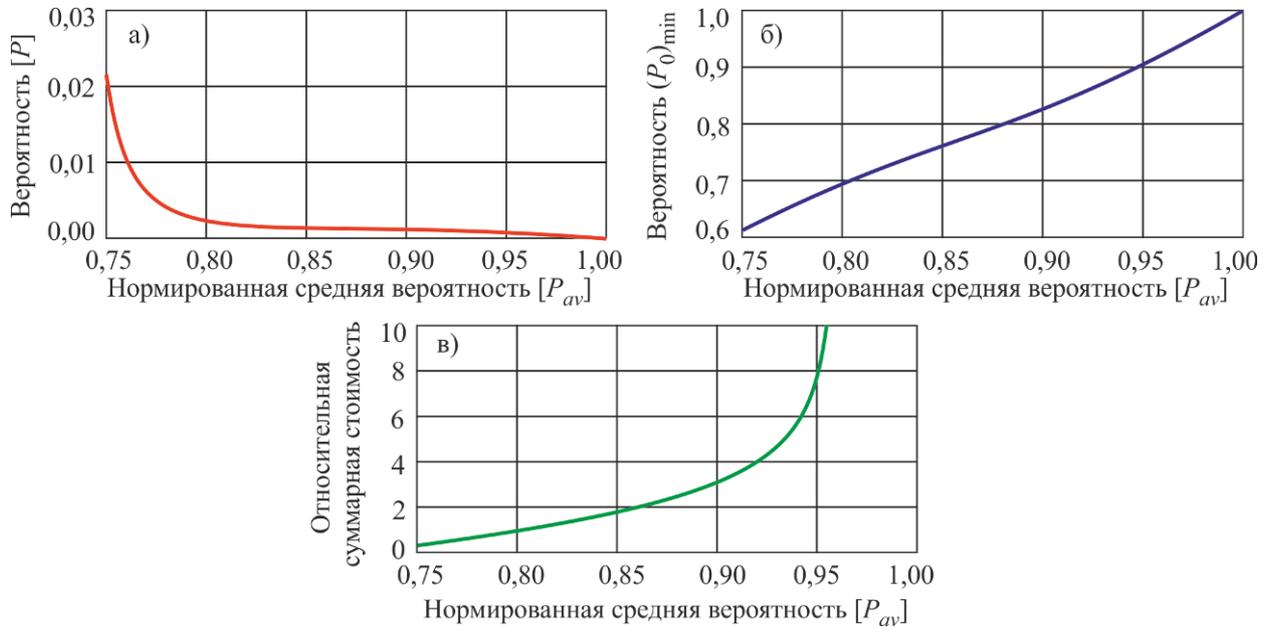


Рис. 8. Характеристики наиболее эффективных стратегий восстановления в зависимости от нормированной вероятности $[P_{av}]$: а - предельно допустимая вероятность критического отказа $[P]$; б - минимальная вероятность безотказной работы $(P_0)_{min}$; в - относительная суммарная стоимость ремонтов \bar{C}_{rp}

Таблица 1

Расчетные параметры наиболее эффективных стратегий восстановления работоспособности канатной системы

Наименование параметра	Значение параметра при $[P_{av}]$				
	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
Число плановых ремонтов N_{rp}	11	11	11	10	5
Предельно допустимая вероятность критического отказа $[P]$	0,0005	0,0005	0,0099	0,0155	0,0214
Фактическая средняя вероятность безотказной работы $(P_0)_{av}$	0,9524	0,9003	0,8517	0,8050	0,7547
Минимальная вероятность безотказной работы $(P_0)_{min}$	0,9066	0,8204	0,7588	0,6998	0,6109
Относительная суммарная стоимость ремонтов \bar{C}_{rp}	7,62	3,14	1,72	1,08	0,53
Разброс относительной суммарной стоимости ремонтов \bar{C}_{rp}	7,62...9,44	3,14...3,86	1,72...2,08	1,08...1,08	0,53...0,60

Таблица 2

Объем плановых ремонтов для наиболее эффективной стратегии восстановления канатной системы при нормированном значении средней вероятности безотказной работы [P_{av}]=0,95

Обозначение элемента	Номер планового ремонта										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H(h1,1)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ГМ(h1,2)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ц1(h1,3)											
Ц2(h1,4)											
Б(h1,5)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
КД(h1,6)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ф(h1,7)				x				x			
P1(h1,8)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
P2(h1,9)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
P3(h1,10)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
P4(h1,11)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ДР1(h1,12)		x		x		x		x		x	
ДР2(h1,13)		x		x		x		x		x	
ЗМ1(h1,14)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ЗМ2(h1,15)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
h1,16			x			x			x		
h1,17	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
h1,18			x			x			x		
КШ(m1,1)											
НК(m1,2)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ГУ(m1,3)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
С(m1,4)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
РТ(m1,5)											
Т(m1,6)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
М1-3(m1,7)			x			x			x		
П1(m1,8)								x			
П2(m1,9)			x			x			x		
m1,10		x		x		x		x		x	
МП(e1,1)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ПУ(e1,2)								x			
ПИ(e1,3)								x			
ЭМ1(e1,4)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ЭМ2(e1,5)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ЭМ3(e1,6)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ЭМ4(e1,7)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ДЧ1(e1,8)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ДЧ3(e1,9)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ДН1(e1,10)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ДН2(e1,11)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ДВ(e1,12)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Число элементов, шт.	25	28	29	29	25	32	25	31	29	28	28
Относительная стоимость ремонта	0,667	0,699	0,689	0,711	0,667	0,721	0,667	0,744	0,689	0,699	0,699

Таблица 3

Объем плановых ремонтов для наиболее эффективной стратегии восстановления канатной системы при нормированном значении средней вероятности безотказной работы [P_{av}]=0,90

Обозначение элемента	Номер планового ремонта										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H(h1,1)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ГМ(h1,2)		x		x		x		x		x	
Ц1(h1,3)											
Ц2(h1,4)											
Б(h1,5)				x				x			
КД(h1,6)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ф(h1,7)											
P1(h1,8)		x		x		x		x		x	
P2(h1,9)		x		x		x		x		x	
P3(h1,10)		x		x		x		x		x	
P4(h1,11)		x		x		x		x		x	
ДР1(h1,12)											
ДР2(h1,13)											
ЗМ1(h1,14)									x		
ЗМ2(h1,15)									x		
h1,16											
h1,17											x
h1,18											
КШ(m1,1)											
НК(m1,2)		x		x		x		x		x	
ГУ(m1,3)		x		x		x		x		x	
С(m1,4)		x		x		x		x		x	
РТ(m1,5)											
Т(m1,6)	x		x		x		x		x		x
М1-3(m1,7)											
П1(m1,8)											
П2(m1,9)											
m1,10											
МП(e1,1)					x					x	
ПУ(e1,2)											
ПИ(e1,3)											
ЭМ1(e1,4)				x				x			
ЭМ2(e1,5)				x				x			
ЭМ3(e1,6)				x				x			
ЭМ4(e1,7)				x				x			
ДЧ1(e1,8)		x		x		x		x		x	
ДЧ3(e1,9)		x		x		x		x		x	
ДН1(e1,10)		x		x		x		x		x	
ДН2(e1,11)		x		x		x		x		x	
ДВ(e1,12)		x		x		x		x		x	
Число элементов, шт.	3	15	3	20	4	15	3	20	5	16	4
Относительная стоимость ремонта	0,086	0,453	0,086	0,495	0,209	0,446	0,086	0,495	0,120	0,569	0,093

Таблица 4

Объем плановых ремонтов для наиболее эффективной стратегии восстановления канатной системы при нормированном значении средней вероятности безотказной работы [P_{av}]=0,85

Обозначение элемента	Номер планового ремонта										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H(h1,1)	x		x	x		x		x		x	
ГМ(h1,2)			x			x			x		
Ц1(h1,3)											
Ц2(h1,4)											
Б(h1,5)								x			
КД(h1,6)		x		x		x		x		x	
Ф(h1,7)											
P1(h1,8)			x				x				x
P2(h1,9)			x				x				x
P3(h1,10)			x				x				x
P4(h1,11)			x				x				x
ДР1(h1,12)											
ДР2(h1,13)											
ЗМ1(h1,14)											
ЗМ2(h1,15)											
h1,16											
h1,17											
h1,18											
КШ(m1,1)											
НК(m1,2)						x			x		
ГУ(m1,3)				x				x			
С(m1,4)						x			x		
РТ(m1,5)											
Т(m1,6)		x			x			x			x
М1-3(m1,7)											
П1(m1,8)											
П2(m1,9)											
m1,10											
МП(e1,1)									x		
ПУ(e1,2)			x								
ПИ(e1,3)											
ЭМ1(e1,4)			x						x		
ЭМ2(e1,5)									x		
ЭМ3(e1,6)									x		
ЭМ4(e1,7)									x		
ДЧ1(e1,8)			x			x			x		
ДЧ3(e1,9)			x			x			x		
ДН1(e1,10)			x			x			x		
ДН2(e1,11)			x			x			x		
ДВ(e1,12)			x			x			x		
Число элементов, шт.	1	2	13	3	1	10	4	5	13	2	5
Относительная стоимость ремонта	0,064	0,022	0,394	0,115	0,007	0,301	0,108	0,147	0,370	0,079	0,115

7. Заключение

Формирование уже на этапе проектирования эффективной стратегии восстановления работоспособности важнейшего элемента мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов – канатной системы – является перспективным направлением совершенствования эксплуатационных показателей указанного технологического оборудования.

Предложенный в работе подход позволяет поддерживать исходно заданный при проектировании уровень надежности канатной системы на основе упреждающей замены во

время планового ремонта в стационарных условиях тех ее структурных элементов, у которых вероятность потери работоспособного состояния достигает к моменту такого ремонта определенного, заданного на этапе проектирования предельно допустимого значения вероятности критического отказа. При этом решается двуединая технико-экономическая задача: обеспечение приемлемо высокого уровня надежности и технического риска при одновременном обеспечении минимально возможной суммарной стоимости и числа ремонтов в течение всего заданного срока эксплуатации мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса.

Список литературы

1. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи Б.Ч., Лагереv И.А., Панфилов А.В., Таричко В.И. Транспортно-логистические технологии и машины для цифровой урбанизированной среды. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. 268 с.

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

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

3. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv 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: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275>

4. Брауде В.И., Семенов Л.Н. Надежность подъемно-транспортных машин. М.: Машиностроение, 1986. 183 с.

5. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560.

6. Анцев В.Ю., Витчук П.В., Крылов К.Ю. Классификация дефектов и отказов

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 machines for the digital urban environment]. Rostov-on-Don, DGTU, 2019. 268 p. (In Russian)

2. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P. General stability of a base vehicle of a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 210-220. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-209-220> (In Russian)

3. 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 reloading ropeway. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 256-275. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275> (In Russian)

4. Braude V.I., Semenov L.N. *Nadezhnost podemno-transportnykh mashin* [Reliability of carrying and lifting machines]. Leningrad, Mashinostroenie, 1986. 183 p. (In Russian)

5. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost mashin* [Machine parametric reliability]. Moscow, MGTU imeni N.E. Bauman, 2002. 560 p. (In Russian)

6. Antsev V.Yu., Vitchuk P.V., Krylov

грузоподъемных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 10. С. 121-128.

7. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС / Под ред. А.И. Андрющенко. М.: Высшая школа, 1991. 303 с.

8. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов. М.: Наука, 1996. 400 с.

9. Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

10. Лагерева А.В., Лагерева Е.А., Лагерева И.А. Вероятностная оценка надежности гидропривода кранов-манипуляторов путем имитационного моделирования потока отказов элементов // Приводы и компоненты машин. 2012. № 2-3. С. 2-5.

11. Лагерева 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.

12. Лагерева А.В., Таричко В.И., Лагерева И.А. Моделирование режимов работы гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480

13. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики. М.: Финансы и статистика, 1982. 344 с.

K.Yu. Classification of defects and failure of lifting machines. *Izvestiya Tl'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2015, No.10, pp. 121-128. (In Russian)

7. *Nadezhnost teploenergeticheskogo oborudovaniya TES i AES* [Reliability of heat power equipment of TPPs and NPPs]. Moscow, Vysshaya shkola, 1991. 303 p. (In Russian)

8. Venttsel A.D. *Kurs teorii sluchaynykh protsessov* [Random Theory Course]. Moscow, Nauka, 1996. 400 p. (In Russian)

9. Khazov B.F., Didusev B.A. *Spravochnik po raschetu nadezhnosti mashin na stadii proektirovaniya* [Handbook for calculating the reliability of machines at the design stage]. Moscow, Mashinostroenie, 1986. 224 p. (In Russian)

10. Lagereva E.A., Lagerev A.V., Lagereva I.A. Probabilistic estimation of reliability of the hydraulic drive of crane-manipulators simulation-based flow of element failures. *Pryvody i komponenty mashin*, 2012, No.2-3, pp. 2-5. (In Russian)

11. 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. (In Russian)

12. 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-tekhnicheskiiy 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)

13. Pollard J.H. A handbook of numerical and statistical techniques. Cambridge University Press, 1977.