



МРНТИ 73.31.41
Обзорная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-151-2-250-261>

Прогнозирование потребности и оптимизация запасных частях для технического обслуживания и ремонта автомобилей

М.Б. Батырбек  , С.Ж. Кабикенов 

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова

E mail: Moldyr240597@mail.ru

Аннотация. Для обеспечения своевременного и эффективного ремонта автотранспортных средств аварийное инженерное оборудование играет ключевую роль в реализации аварийных ремонтных стратегий. Однако в процессе эксплуатации такого оборудования возможны случайные отказы, что требует разработки адекватных стратегий технического обслуживания и управления запасами запасных частей для поддержания его бесперебойной работы. В дополнение, срочность ремонтных заявок может значительно варьироваться, что влияет на порядок их обслуживания. Существующие исследования редко учитывают влияние степени срочности и приоритетов заявок на процесс ремонта. Для заполнения этих пробелов в данной работе предложена совместная оптимизационная модель стратегий технического обслуживания и управления запасами запасных частей для аварийного инженерного оборудования, используемого при ремонте автотранспорта, с учётом приоритетов заявок. Модель включает два типа оборудования с разными скоростями ремонта: одно обеспечивает ускоренное обслуживание срочных заявок, другое регулярное обслуживание. Используется метод внедрения марковского процесса для вывода вероятностных показателей надёжности системы. С целью максимизации доступности системы оптимизируются количество инженеров по ремонту и стратегия управления запасами запасных частей с помощью метода ветвей и границ. Практические примеры подтверждают эффективность предложенной модели и методов в условиях ремонта автотранспорта.

Ключевые слова. ремонт автотранспорта; аварийное инженерное оборудование; приоритет заявок; стратегия технического обслуживания; управление запасами запасных частей; совместная оптимизация.

Поступила 20.05.2025. Доработана 07.06.2025. Одобрена 19.06.2025. Доступна онлайн 30.06.2025

* автор по корреспонденции

Введение

Автотранспорт, как и любое техническое устройство, подвержен износу в процессе эксплуатации. Несвоевременное или недостаточное техническое обслуживание может привести не только к дорогостоящим поломкам, но и создать угрозу безопасности на дороге. Поэтому системный подход к техническому обслуживанию автомобилей — включающий регулярную диагностику, профилактическую замену расходных материалов и ремонт изношенных узлов — является неотъемлемой частью обеспечения их надёжной и безопасной эксплуатации.

Эффективное управление запасами запасных частей особенно актуально в автомобильной отрасли, где затраты на комплектующие играют значительную роль в общем объёме расходов на эксплуатацию и обслуживание транспортных средств. В течение всего срока службы автомобиля, который может достигать 15–20 лет и более, затраты на запасные части — такие как фильтры, тормозные колодки, детали подвески, электроника и другие — могут составить значительную долю от его первоначальной стоимости[1].

Недостаток необходимых автозапчастей на складе может привести к задержкам в ремонте и техническом обслуживании, что, в свою очередь, вызывает простой автомобиля, особенно критичный для коммерческого транспорта. Это не только приносит прямые убытки владельцу, но и может негативно сказаться на уровне удовлетворенности клиентов, если речь идёт, например, об автосервисах или автопарках, обслуживающих клиентов.

Кроме того, автомобильная промышленность сталкивается с проблемой устаревания запчастей: модели автомобилей обновляются, и комплектующие к устаревшим версиям постепенно выводятся из производства. Без должного управления запасами такие детали нередко списываются и продаются по сниженным ценам, что приводит к финансовым потерям.

Таким образом, грамотно организованная система управления запасами автомобильных запчастей позволяет не только сократить издержки, связанные с хранением и логистикой, но и обеспечить своевременное обслуживание автотранспорта, повысить надёжность и продлить срок его службы.

В целом, эффективное управление запасами запасных частей играет ключевую роль в обеспечении необходимого уровня доступности продукции при одновременном снижении экономических и экологических издержек. Это особенно актуально в контексте технического обслуживания и ремонта автомобилей, где своевременное наличие нужных комплектующих напрямую влияет на скорость и качество обслуживания.

Однако организация складского учета и логистики запасных частей сопряжена с рядом сложностей. Во-первых, автомобильные запчасти характеризуются большим ассортиментом и объемом номенклатуры — от мелких расходных материалов до сложных электронных блоков и агрегатов. Это усложняет процесс хранения, учета и планирования поставок.

Во-вторых, спрос на автозапчасти часто носит нерегулярный и периодический характер, что затрудняет его точное прогнозирование. Такой спрос может зависеть от сезонности, моделей автомобилей, а также от непредвиденных поломок.

В-третьих, потребление запасных частей напрямую связано с интенсивностью эксплуатации автомобиля, его техническим состоянием, а также частотой и качеством проводимого технического обслуживания[2]. Например, несвоевременная замена масла или фильтров может привести к более серьезным повреждениям двигателя, что, в свою очередь, потребует дополнительных деталей и увеличит общие расходы.

Таким образом, в сфере автосервиса и послепродажного обслуживания грамотное управление запасами запчастей позволяет обеспечить бесперебойность ремонтных работ, сократить время простоя автомобилей и повысить уровень удовлетворенности клиентов.

Методология

Стратегии технического обслуживания, широко исследуемые в инженерной практике, находят прямое применение в автомобильной сфере, где своевременное и качественное обслуживание позволяет значительно снизить риск внезапных отказов, сократить расходы на ремонт и повысить общую эффективность использования транспортных средств. Исследователи из Школы электронной коммерции и логистики Пекинского технологического и коммерческого университета (School of E-Business and Logistics, Beijing Technology and Business University) активно занимаются разработкой и совершенствованием различных подходов к техническому обслуживанию и ремонту автомобилей. В частности, Ван и коллеги [3] предложили комплексную стратегию, включающую профилактическое, корректирующее и экстренное обслуживание, ориентированную на узлы и механизмы автомобилей, подверженные внезапным нагрузкам. Подобный подход может эффективно применяться в автомобильной отрасли, где транспортные средства часто эксплуатируются в условиях переменных нагрузок и нестабильных дорожных ситуаций. Кроме того, Дуй и соавт. [4], а также Ли и др. [5] исследовали стратегии профилактического технического обслуживания, адаптированные для промышленных систем и специфических условий эксплуатации, включая дорожные. Эти исследования имеют прямое значение для автомобильной сферы, где регулярное профилактическое обслуживание — замена масла, фильтров, тормозных колодок, диагностика ходовой части и других ключевых компонентов — позволяет предотвратить серьезные поломки и продлить срок службы автомобиля. Также стоит отметить работу Ван и коллег [6], которые предложили методику, сочетающую профилактическое обслуживание с переназначением функционала отдельных компонентов системы, что позволяет сохранять её работоспособность и повышать общую надежность. В контексте автомобильной эксплуатации это может выражаться, например, в адаптации или замене узлов на менее нагруженные в зависимости от текущего технического состояния, что способствует более рациональному использованию ресурса автомобиля и снижению затрат на ремонт.

Помимо естественного износа автомобильных систем и компонентов, в процессе эксплуатации могут происходить случайные поломки, которые часто требуют немедленного вмешательства. Неисправные транспортные средства, неспособные продолжать движение или выполнять свои функции, подлежат ремонту с использованием новых запасных частей. При наличии необходимого запаса деталей на складе восстановительные работы выполняются специалистами по техническому обслуживанию. Однако их количество ограничено — допустим, всего к автомеханикам в автосервисе, — что

означает: если одновременно поступает несколько автомобилей с поломками, часть из них может быть поставлена в очередь на ремонт.

Ситуация усложняется, если запчасти, необходимые для ремонта, отсутствуют на складе. В таком случае, несмотря на наличие свободных специалистов, ремонт невозможен до поступления заказа. Поэтому эффективное управление запасами деталей критически важно для обеспечения бесперебойной работы автосервиса и сокращения времени простоя автомобилей.

Часто в автосервисах применяется стратегия управления запасами по политике (s, S) , которая заключается в следующем: когда количество запасных частей опускается ниже установленного минимального уровня s , размещается заказ на пополнение до максимально допустимого уровня S . Такая система позволяет заранее реагировать на снижение запасов и минимизировать риски задержек в ремонте.

Кроме того, многие автомобили различных марок и моделей могут использовать общие компоненты — такие как фильтры, тормозные колодки, свечи зажигания и т.п. — что позволяет оптимизировать складские запасы за счёт унификации. Однако это также требует чёткой логистики и точного прогнозирования спроса, особенно при сезонных нагрузках или всплесках обращений в автосервис.

Таким образом, организация технического обслуживания и ремонта автомобилей напрямую зависит от грамотного планирования ресурсов — как человеческих, так и материальных. Эффективное взаимодействие между запасами запчастей и доступностью квалифицированного персонала позволяет обеспечить высокую скорость и качество обслуживания, что критически важно как для частных автовладельцев, так и для коммерческих автопарков.

Для устранения выявленных научных пробелов в данной работе исследуется комплексный процесс эксплуатации аварийного инженерного оборудования, предназначенного для удовлетворения потребностей различной срочности. Рассматриваются мероприятия по техническому обслуживанию, а также процессы обеспечения и пополнения запасных частей.

Разработана модель, направленная на совместную оптимизацию стратегии управления запасами запасных частей и количества инженеров, осуществляющих корректирующее техническое обслуживание, с целью максимизации готовности системы. В модели новаторским образом учитывается влияние приоритетности заявок.

Для получения показателей надежности системы и решения построенной оптимизационной модели используются метод вложения марковского процесса и метод ветвей и границ соответственно.

Срочные заявки поступают в систему с интенсивностью $d_1 = 5$ и автоматически обслуживаются оборудованием типа I. Однако из-за возможной занятости оборудования типа I, клиенты могут либо покинуть станцию с вероятностью $P_{10} = 0,5$, либо ожидать в очереди на оборудование типа I с вероятностью $P_{11} = 0,5$.

Несрочные заявки поступают с интенсивностью $d_2 = 4$ и имеют приоритет обслуживания оборудованием типа II. Если оборудование типа II недоступно, клиенты с несрочными заявками могут выбрать одно из следующих действий:

1. покинуть станцию с вероятностью $P_{20} = 0,5$;
2. перейти к обслуживанию на оборудование типа I с вероятностью $P_{21} = 0,25$;

3. ждать в очереди на оборудование типа II с вероятностью $P_{22} = 0,25$.
Максимальная вместимость очереди для обоих типов оборудования составляет по два клиента ($m = 2, n = 2$).

Таблица 1
Сравнительный анализ исследований с предлагаемой моделью

Исследование	Структура системы	Оптимизируемая политика	Методология	Учет приоритетности заявок
[1]	Одноэлементная система	Предупредительное обслуживание и порог заказа запчастей	Стохастическое динамическое программирование и моделирование; метод перебора	Нет
[2]	Резервная система	Предупредительное обслуживание и управление запасами	Моделирование	Нет
[3]	Многокомпонентная система	Обслуживание по техническому состоянию и управление запасами	Генетический алгоритм	Нет
[5]	Параллельная или последовательно параллельная система	Профилактическое обслуживание и запасы [20, 21]; оппортунистическое обслуживание и запасы [22]	Моделирование;	Нет
[7]	k-из-n: F система; Ветроэлектростанция на суше; Двухэлементная последовательная система	Обслуживание по техническому состоянию и управление запасами	Динамическое программирование	Нет
[8]	Сервисная система, ориентированная на использование	Обслуживание по техническому состоянию и управление запасами	Марковский процесс принятия решений и последовательное эвристическое решение	Нет
Настоящая работа	Сервисная система с двумя типами оборудования	Распределение инженеров для корректирующего обслуживания и стратегия управления запасами	Метод вложения марковского процесса и метод ветвей и границ	Срочные заявки имеют более высокий приоритет

С целью наглядного сравнения предыдущих исследований с предлагаемой моделью в Таблице 1 приведён сравнительный анализ.

Необходимость и преимущества использования метода вложения марковского процесса в настоящем исследовании обосновываются его высокой эффективностью в описании сложного процесса функционирования рассматриваемой системы, включающего деградацию оборудования, его обслуживание, пополнение запасных частей и выполнение заявок с учётом их приоритета.

В отличие от метода вложения марковского процесса, применение других математических методов для моделирования и анализа надёжности данной системы затруднено из-за её высокой сложности. Кроме того, метода вложения марковского процесса позволяет аналитически и компактно получить показатели надёжности системы, что делает решение этой сложной задачи возможным [28–30]. Метода вложения марковского процесса получил широкое распространение при моделировании процессов функционирования инженерных систем и оценке их надёжностных характеристик [5].

Например, Wu и др. [7], а также Wang и др. [8] использовали метода вложения марковского процесса для описания процессов деградации сбалансированных систем, учитывая механизмы совместного использования ресурсов и ограниченного перераспределения. Wang и др. [7] с помощью метода вложения марковского процесса вывели формулы надёжности подсистем, подверженных деградации, внешним воздействиям и защитным механизмам.

Что касается методов решения сопутствующих задач оптимизации, в предыдущих исследованиях применялись метод ветвей и границ [7, 8], алгоритм серого волка [9], генетический алгоритм, алгоритм роя частиц и другие. Поскольку предлагаемая задача оптимизации относится к задачам целочисленного программирования, метод ветвей и границ обеспечивает высокую эффективность при их решении. Однако при решении более сложных нелинейных целочисленных задач уместно использовать эвристические методы, например, генетический алгоритм, для получения оптимальных решений.

Ключевые научные результаты настоящей работы можно сформулировать в четырёх положениях:

1. Построена совместная оптимизационная модель стратегии управления запасами запасных частей и стратегий технического обслуживания для сервисной системы, включающей два типа аварийного инженерного оборудования;
2. Учитывается различный приоритет заявок, выполняемых аварийным инженерным оборудованием, в соответствии с реальными условиями эксплуатации;
3. Эффективно применён метод вложения марковского процесса (MPIM) для формализации ряда показателей надёжности системы, включая доступность запасных частей, инженеров по техническому обслуживанию и всей сервисной системы;
4. Успешно применён метод ветвей и границ для решения совместной оптимизационной модели и получения оптимальных совместных решений по стратегии управления запасами запасных частей и распределению инженеров по техническому обслуживанию.

Результаты и Обсуждения

Эффективность построенной модели наглядно демонстрируется и подтверждается численными примерами с применением к реальному инженерному объекту — аварийному зарядному оборудованию.

В системе предусмотрены два типа аварийного зарядного оборудования: оборудование типа I и типа II, обеспечивающее, соответственно, экспресс- и обычные услуги по зарядке. Предполагается, что станция обслуживания состоит из трёх ($u = 3$) единиц оборудования типа I и двух ($v = 2$) единиц оборудования типа II.

В таблице 2 приведены соответствующие настройки параметров.

Таблица 2. Настройки параметров

Параметр	Описание	Значение
d_1	Интенсивность поступления срочных заявок	5
d_2	Интенсивность поступления несрочных заявок	4
P_{10}	Вероятность ухода клиента при отсутствии оборудования типа I	0.5
P_{11}	Вероятность ожидания в очереди на оборудование типа I	0.5
P_{20}	Вероятность ухода клиента при отсутствии оборудования типа II	0.5
P_{21}	Вероятность перехода к оборудованию типа I	0.25
P_{22}	Вероятность ожидания в очереди на оборудование типа II	0.25
η_1	Количество оборудования типа I	9
η_2	Количество оборудования типа II	7
λ_1	Интенсивность отказов оборудования типа I	1.5
λ_2	Интенсивность отказов оборудования типа II	1
ω_1	Интенсивность восстановления оборудования типа I	12
ω_2	Интенсивность восстановления оборудования типа II	10
τ	Интенсивность переходов	9

Дальнейший анализ на основе рисунков 3–7 выполнен при заданных значениях параметров $(s, S) = (4, 5)$ и $k = 5$. Влияние скорости технического обслуживания на показатели надёжности системы показано на рисунке 3. Поскольку влияние параметров ω_1 и ω_2 на показатели надёжности системы схожее, в данном разделе в качестве примера рассматривается только ω_1 .

Как видно на рисунке 3, все значения доступности увеличиваются с ростом ω_1 . Следует отметить, что как доступность запасных частей, так и доступность всей системы значительно возрастают с увеличением ω_1 . Однако темпы роста доступности запасных частей и системы постепенно снижаются. При увеличении ω_1 до 15 доступность инженеров по обслуживанию приближается к 1, а доступность системы и запасных частей достигает 0,83 и 0,97 соответственно.

По мере увеличения скорости технического обслуживания повышается эффективность работы инженеров, что позволяет быстрее выполнять ремонт вышедшего из строя оборудования и способствует росту показателей доступности.

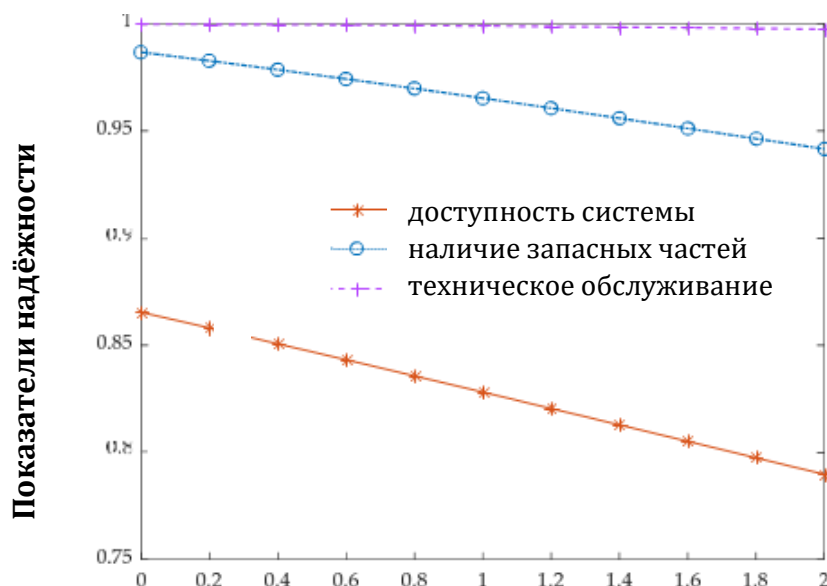


Рисунок 1. Влияние λ_2 на показатели надёжности системы.

Рассматривая показатель отказов оборудования типа II в качестве примера, на рисунке 4 проанализировано влияние интенсивности отказов оборудования на показатели надёжности системы. На рисунке 1 видно, что с ростом интенсивности отказов снижаются доступность системы, доступность запасных частей и доступность инженеров по техническому обслуживанию.

Наиболее заметно изменяется доступность системы, поскольку при увеличении числа неисправного аварийного зарядного оборудования становится невозможным своевременно обслуживать клиентов.

Кроме того, доступность инженеров и запасных частей снижается незначительно при росте интенсивности отказов оборудования. Это связано с тем, что политика своевременного пополнения запасов и достаточное количество инженеров позволяют удовлетворять потребности по замене вышедшего из строя оборудования.

В частности, запасы запасных частей успевают пополняться, а количество инженеров достаточно для обслуживания оборудования, если только интенсивность отказов не становится чрезмерно высокой.

Заключение

В данной работе рассматривается задача совместного определения оптимальных стратегий технического обслуживания и управления запасами запасных частей для аварийного инженерного оборудования с учётом приоритета заявок как принципа,

влияющего на последовательность обслуживания. Конкретно, в модели предусмотрены два типа оборудования, предоставляющие, соответственно, экспресс-обслуживание и обычное обслуживание. Срочные заявки имеют более высокий приоритет обслуживания по сравнению с несрочными при одновременном ожидании в очереди на оборудование экспресс-сервиса, что обусловлено общепринятыми социальными нормами.

С помощью метода внедрения марковского процесса описывается рабочий процесс предложенной системы и аналитически выводятся ряд вероятностных показателей, связанных с надёжностью системы, таких как доступность системы обслуживания, запасных частей и инженеров по обслуживанию.

Далее формулируется совместная оптимизационная модель, цель которой — максимизация доступности системы при ограничениях на доступность инженеров, запасных частей и общий бюджет. Оптимальная численность инженеров и стратегия управления запасами определяются путём решения данной модели с использованием метода ветвей и границ (branch-and-bound).

В завершение приводится инженерный пример аварийного зарядного оборудования, который служит для проверки работоспособности модели и эффективности применённых методов. Кроме того, проводится анализ влияния различных параметров модели на вероятностные показатели надёжности системы посредством комплексного анализа чувствительности.

Перспективные направления дальнейших исследований включают:

- рассмотрение вероятностных результатов технического обслуживания, выполненного инженерами, включая как идеальное, так и неидеальное обслуживание;
- построение более сложной и комплексной модели надёжности, учитывающей множественные приоритеты, что позволит расширить теорию надёжности сложных систем с аварийным инженерным оборудованием.

Вклад авторов

М.Б. Батырбек — формулировка цели исследования, разработка модели прогнозирования потребности в запасных частях, анализ результатов.

С.Ж. Кабикенов — сбор и обработка исходных данных, участие в оптимизации стратегии управления запасами, редактирование и оформление статьи.

Список литературы

1. Ван С.Ю., Чжао С., Ван С.К., Сун Л.П. Надёжность и техническое обслуживание сбалансированных систем с учётом воздействия ударной среды. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2020, 195, 106705.
2. Дуй Х.Ю., Ян С.Дж., Фан Я.Н. Методология оценки профилактического обслуживания в многостадийных производственных системах с учётом различных затрат. Int. J. Prod. Res. 2022.
3. Ли Ц.Л., Инь Г.Х., Ван С.Ф., Ян В.С. Автоматическое принятие решений при профилактическом обслуживании дорожного покрытия с использованием глубокого обучения. Autom. Constr. 2022, 135, 104111.
4. Ван С.К., Чжао С., У Ц.С., Ван С.Ю. Совместная оптимизация переназначения компонентов на нескольких этапах и профилактического обслуживания для

- сбалансированных систем с учётом несовершенного обслуживания. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2023, 237, 109367.
5. Дун Э.Дж., Гао Т.Л., Чэн Ч.Х., Ван Р.Ц., Бай Ю.С. Стратегия оппортунистического обслуживания сложного оборудования с применением генетического алгоритма с учётом зависимости отказов: двухмерный подход к гарантии. Sensors 2022, 22, 6801.
 6. Ли Х., Хуанг Ц.Г., Соарес К.Г. Стратегии инспекции в реальном времени и оппортунистического обслуживания для плавающих оффшорных ветряных турбин. Ocean Eng. 2022, 256, 111433.
 7. Брук М., Тюнтер Р.Х., де Йонге Б., Велдман Дж. Совместная оптимизация технического обслуживания на основе состояния и оптимизации производства на основе состояния. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2021, 214, 107743.
 8. Чжэн Р., Макис В. Оптимальное техническое обслуживание на основе состояния с общим ремонтом и двумя зависимыми режимами отказа. Comput. Ind. Eng. 2020, 141, 106322.
 9. Шен Ц.Й., Цуй Л.Р., Ма Ю.З. Доступность и оптимальная политика технического обслуживания для систем с деградацией в динамических средах. Eur. J. Oper. Res. 2019, 276, 133–143.
 10. Лю Ц.Н., Ма Л., Ван Н.Ц., Чэнь А.К., Цзян Ц.Х. Модель технического обслуживания на основе состояния с учётом множества эффектов обслуживания на зависимые процессы отказов. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2022, 220, 108267.
 11. Ян М., Ли Ц.Б., Танг Ю., Сюн М.К. Стратегия технического обслуживания с ориентиром на доступность ключевого оборудования автоматизированной производственной линии с учётом деградации производительности. IEEE Robot. Autom. Lett. 2023, 8, 3182–3189.

М.Б. Батырбек, С.Ж. Қабикиенов

Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті

**Автомобильдерді техникалық қызмет көрсету және жөндеу үшін қосалқы
бөлшектерге қажеттілікті болжау және оңтайландыру**

Аннотация. Автотранспорт құралдарын уақытылы және тиімді жөндеу жұмыстарын қамтамасыз ету үшін төтенше инженерлік жабдықтар апаттық жөндеу стратегияларын жүзеге асыруда маңызды рөл атқарады. Алайда, осы жабдықтарды пайдалану кезінде кездейсоқ ақаулар туындауы мүмкін, бұл оның үздіксіз жұмысын қамтамасыз ету үшін техникалық қызмет көрсету мен қосалқы бөлшектер қорының тиімді басқару стратегияларын әзірлеуді талап етеді. Сонымен қатар, жөндеу өтініштерінің шұғылдылығы айтарлықтай өзгеруі мүмкін, бұл олардың қызмет көрсету тәртібіне әсер етеді. Қазіргі зерттеулер көбінесе шұғылдық дәрежесінің және өтініштердің басымдылығының жөндеу процесіне әсерін ескермейді. Осы олқылықтарды жою мақсатында, бұл жұмыста автокөлікті жөндеу кезінде қолданылатын төтенше инженерлік жабдықтар үшін техникалық қызмет көрсету мен қосалқы бөлшектер қорын басқару

стратегияларының басымдықтарды ескере отырып, бірлескен оңтайландыру моделі ұсынылады. Модель екі түрлі жөндеу жылдамдығы бар екі жабдық түрін қамтиды: біреуі шұғыл өтініштерді жедел қанағаттандыруды, ал екіншісі — қалыпты қызмет көрсетуді қамтамасыз етеді. Жүйенің сенімділік ықтималдық көрсеткіштерін алу үшін Марков процессін енгізу әдісі қолданылады. Жүйенің қолжетімділігін максималдау мақсатында жөндеу инженерлерінің саны мен қосалқы бөлшектер қорын басқару стратегиясы тармақтар мен шекаралар әдісі арқылы оңтайландырылады. Практикалық мысалдар ұсынылған модель мен әдістердің автокөлікті жөндеу жағдайларында тиімділігін растайды.

Түйін сөздер: автокөлікті жөндеу; төтенше инженерлік жабдықтар; өтініштердің басымдылығы; техникалық қызмет көрсету стратегиясы; қосалқы бөлшектер қорын басқару; бірлескен оңтайландыру.

M.B. Batyrbek, S.Zh. Kabikenov

Abylkas Saginov Karaganda Technical University

Forecasting Demand and Optimization of Spare Parts for Maintenance and Repair of Automobiles

Abstract. Emergency engineering equipment plays a key role in implementing emergency repair strategies to ensure timely and efficient maintenance of vehicles. However, random failures of this equipment may occur during operation, necessitating the development of adequate maintenance strategies and spare parts inventory management to ensure its continuous operation. Moreover, the urgency level of repair requests can vary significantly, affecting the order in which they are serviced. Existing studies rarely consider the impact of urgency levels and request priorities on the repair process. To address these gaps, this paper proposes a joint optimization model of maintenance and spare parts inventory strategies for emergency engineering equipment used in vehicle repair, taking into account request priorities. The model includes two types of equipment with different repair speeds: one provides expedited service for urgent requests, while the other handles regular service. The Markov process embedding method is employed to derive probabilistic reliability indicators of the system. To maximize system availability, the number of maintenance engineers and the spare parts inventory strategy are optimized using the branch-and-bound method. Practical examples demonstrate the effectiveness of the proposed model and methods in vehicle repair scenarios.

Keywords: vehicle repair; emergency engineering equipment; request priority; maintenance strategy; spare parts inventory management; joint optimization.

References

1. Wang, X.Y.; Zhao, X.; Wang, S.Q.; Sun, L.P. Reliability and maintenance for performance-balanced systems operating in a shock environment. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2020, *195*, 106705. [[CrossRef](#)]
2. Dui, H.Y.; Yang, X.J.; Fang, Y.N. Evaluation methodology for preventive maintenance in multi-state manufacturing systems considering different costs. *Int. J. Prod. Res.* 2022.

3. Li, J.L.; Yin, G.H.; Wang, X.F.; Yan, W.X. Automated decision making in highway pavement preventive maintenance based on deep learning. *Autom. Constr.* 2022, 135, 104111. [[CrossRef](#)]
4. Wang, S.Q.; Zhao, X.; Wu, C.S.; Wang, X.Y. Joint optimization of multi-stage component reassignment and preventive maintenance for balanced systems considering imperfect maintenance. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2023, 237, 109367. [[CrossRef](#)]
5. Dong, E.Z.; Gao, T.L.; Cheng, Z.H.; Wang, R.C.; Bai, Y.S. Opportunistic maintenance strategy for complex equipment with a genetic algorithm considering failure dependence: A two-dimensional warranty perspective. *Sensors* 2022, 22, 6801. [[CrossRef](#)]
6. Li, H.; Huang, C.G.; Soares, C.G. A real-time inspection and opportunistic maintenance strategies for floating offshore wind turbines. *Ocean Eng.* 2022, 256, 111433. [[CrossRef](#)]
7. Broek, M.; Teunter, R.H.; de Jonge, B.; Veldman, J. Joint condition-based maintenance and condition-based production optimization. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2021, 214, 107743. [[CrossRef](#)]
8. Zheng, R.; Makis, V. Optimal condition-based maintenance with general repair and two dependent failure modes. *Comput. Ind. Eng.* 2020, 141, 106322. [[CrossRef](#)]
9. Shen, J.Y.; Cui, L.R.; Ma, Y.Z. Availability and optimal maintenance policy for systems degrading in dynamic environments. *Eur. J. Oper. Res.* 2019, 276, 133–143. [[CrossRef](#)]
10. Liu, Q.N.; Ma, L.; Wang, N.C.; Chen, A.K.; Jiang, Q.H. A condition-based maintenance model considering multiple maintenance effects on the dependent failure processes. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2022, 220, 108267. [[CrossRef](#)]
11. Dui, H.Y.; Zhang, C.; Tian, T.Z.; Wu, S.M. Different costs-informed component preventive maintenance with system lifetime changes. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2022, 228, 108755.

Информация об авторах

М.Б. Батырбек — докторант кафедры «Транспортная техника и логистика», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова.

С.Ж. Кабикенов — к.т.н, доцент кафедры «Транспортная техника и логистика», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова.

М.Б. Батырбек — Абылас Сагинов атындағы Қарағанды техникалық университетінің «Көлік техникасы және логистика» кафедрасының докторанты.

С.Ж. Кабикенов — техникалық ғылымдар кандидаты, «Көлік техникасы және логистика» кафедрасының доценті, Абылас Сагинов атындағы Қарағанды техникалық университеті.

M.B. Batyrbek — Doctoral student at the Department of Transport Engineering and Logistics, Abylka Saginov Karaganda Technical University.

S.Zh. Kabikenov — Candidate of Technical Sciences, Docent at the Department of Transport Engineering and Logistics, Abylka Saginov Karaganda Technical University.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).