

МЕТОДОЛОГИЯ НАУЧНОГО АНАЛИЗА ДЕГРАДАЦИОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Матвиенко С.А., Стрельник Ю.Н.

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
Макеевка, Россия*

Ключевые слова: деградация, марковский процесс, переходные вероятности, прогнозирование, предельное состояние, остаточный ресурс.

Аннотация. В статье представлена комплексная методология научного анализа деградационного изменения автотранспортных средств на основе математического моделирования с использованием марковских процессов, теории надежности и методов оптимизации. Целью работы является повышение точности прогнозирования остаточного ресурса автотранспортных средств и оптимизация стратегий технического обслуживания, направленные на повышение эффективности управления автопарком. Предложена классификация деградационных состояний автотранспортных средств, детализирующая изменения в техническом состоянии и обеспечивающая принятие решений на основе расчета среднего ресурса путем решения системы линейных уравнений, калибруемых с учетом эксплуатационных факторов. Результаты исследования могут быть использованы для разработки эффективных стратегий технического обслуживания и ремонта автотранспортных средств.

METHODOLOGY OF SCIENTIFIC ANALYSIS OF DEGRADATION CHANGES IN VEHICLES

Matvienko S.A., Strelnik Yu.N.

*Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka,
Russia*

Keywords: degradation, Markov process, transition probabilities, forecasting, limiting state, residual resource.

Abstract. The article presents a comprehensive methodology for scientific analysis of degradation changes in motor vehicles based on mathematical modeling using Markov processes, reliability theory, and optimization methods. The goal of this work is to improve the accuracy of predicting the residual resource of motor vehicles and optimize maintenance strategies to enhance fleet management efficiency. The article proposes a classification of degradation states of motor vehicles that details changes in their technical condition and enables decision-making based on calculating the average resource by solving a system of linear equations that are calibrated based on operational factors. The research results can be used to develop effective strategies for vehicle maintenance and repair.

Введение. Эффективное управление парком автотранспортных средств (АТС) является ключевой задачей для предприятий транспортной отрасли, строительных организаций, сельскохозяйственных комплексов и других сфер деятельности, где эксплуатируется автотехника. Одним из определяющих факторов эффективности является поддержание АТС в работоспособном состоянии на протяжении всего жизненного цикла. В процессе эксплуатации АТС подвергаются воздействию различных негативных факторов,

приводящих к постепенному ухудшению их технического состояния, то есть деградации. Деградация проявляется в износе деталей, изменении характеристик материалов, накоплении повреждений и, в конечном итоге, может привести к деградационному отказу – нарушению работоспособности [1-4]. По статистике внезапные отказы АТС приводят к увеличению простоев на 15-20%, что негативно сказывается на эффективности перевозок и приводит к убыткам.

В условиях современной экономики, когда предприятия стремятся к оптимизации затрат и повышению производительности, возрастает роль предиктивного анализа технического состояния АТС. Традиционные подходы к техническому обслуживанию (ТО), основанные на фиксированных интервалах, зачастую оказываются неэффективными. Они могут приводить к излишним затратам на обслуживание АТС, которая еще не выработала свой ресурс, или, наоборот, к пропускам дефектов и последующим дорогостоящим ремонтам, вызванным внезапными отказами. Использование предиктивных стратегий ТО позволяет снизить затраты на обслуживание на 10-15% и увеличить коэффициент технической готовности АТС на 5-7%, что говорит о значительных резервах повышения эффективности.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка и внедрение методологий, позволяющих точно оценивать техническое состояние АТС, прогнозировать их остаточный ресурс и на этой основе оптимизировать стратегии ТО. Анализ деградации, включающий оценку текущего состояния, прогнозирование остаточного ресурса, оптимизацию стратегий ТО и принятие обоснованных решений о замене или утилизации АТС, представляет собой перспективный подход к эффективному управлению жизненным циклом автотранспортного парка.

В последние годы широкое распространение получили математические методы моделирования деградации технических систем, позволяющие учитывать стохастический характер процессов износа и отказов, а также влияние множества эксплуатационных факторов [5-7]. Марковские процессы, в частности, являются мощным инструментом для моделирования эволюции технического состояния АТС, предоставляя возможность прогнозировать вероятность нахождения АТС в каждом из возможных состояний в заданный момент времени [8].

Построение и практическое применение марковских моделей требуют решения ряда сложных задач, включая выбор ключевых показателей деградации, определение дискретных состояний технического состояния АТС, оценку переходных вероятностей между этими состояниями и разработку методов оптимизации стратегий ТО на основе полученных прогнозов.

Целью работы является разработка методологии анализа деградационного изменения технического состояния АТС, основанной на математическом моделировании с использованием марковских процессов, теории надежности и методов оптимизации, включающей в себя все этапы – от определения ключевых показателей до разработки стратегий ТО.

Научная новизна предложенного подхода заключается в комплексном учете эксплуатационных факторов, применении четкой системы состояний, строгом учете статистики для оценки переходных вероятностей, что обеспечивает повышение точности прогнозирования остаточного ресурса и оптимизации интервалов ТО.

Материалы и методы исследования. Методология научного анализа деградационного изменения АТС представлена на рисунке 1.

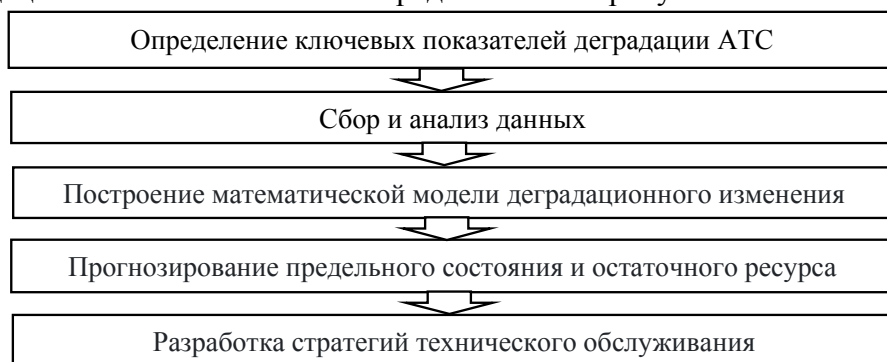


Рис. 1. Методология научного анализа деградационного изменения АТС

Ключевые показатели деградации автомобилей (износа, старения) – характеристики, отражающие ухудшение технико-экономических характеристик машины в процессе эксплуатации (табл. 1).

Табл. 1. Примеры ключевых показателей деградации АТС

№	Элемент АТС	Ключевые показатели деградации
1	Двигатель	компрессия в цилиндрах, расход масла (л/1000 км); мощность двигателя (кВт), дымность выхлопа (%), температура масла (°С), давление масла (МПа); наличие посторонних шумов (дБ) и т.д.
2	Трансмиссия	передаточные числа, вибрации (м/с ²), утечки масла (л/мес), шум при переключении передач (дБ) и т.д.
3	Тормозная система	износ тормозных колодок и дисков (мм), эффективность торможения (%), давление в тормозной системе (МПа) и т.д.
4	Ходовая часть	износ шин (мм), люфт в подвеске (мм), углы установки колес (градусы) и т.д.
5	Электрическая система	напряжение бортовой сети (В), ток утечки (мА), состояние аккумуляторной батареи (%), и т.д.

Выбор ключевых показателей должен осуществляться с учетом типа АТС, условий эксплуатации и доступности данных. Например, для грузовых автомобилей, работающих в тяжелых условиях, более важными могут быть показатели, связанные с износом двигателя и трансмиссии, а для легковых автомобилей, эксплуатируемых в городских условиях, – показатели, связанные с состоянием ходовой части и тормозной системы.

Цель разработки стратегий ТО – минимизировать суммарные затраты на эксплуатацию АТС, включающие: стоимость ТО, стоимость ремонтов, потери от простоя.

Алгоритм оптимизации стратегий ТО включает:

- определение целевой функции (минимизация суммарных затрат на эксплуатацию АТС за период эксплуатации);
- определение ограничений (ограничения на доступность ресурсов (запасные части, персонал), сроки проведения ТО, требования безопасности и экологические нормы);
- выбор методов оптимизации (использование методов математического программирования (например, линейного программирования, динамического программирования) или имитационного моделирования (например, метод Монте-Карло) для поиска оптимального решения).

Для моделирования деградации АТС в данной работе предлагается использовать марковские процессы. Это позволяет учитывать стохастический характер процессов износа и отказов, а также прогнозировать изменение состояния АТС во времени. На основе марковской модели можно прогнозировать: вероятность нахождения АТС в каждом состоянии в заданный момент времени, средний ресурс, наработку до отказа.

Этапы построения марковской модели представлены на рисунке 2.

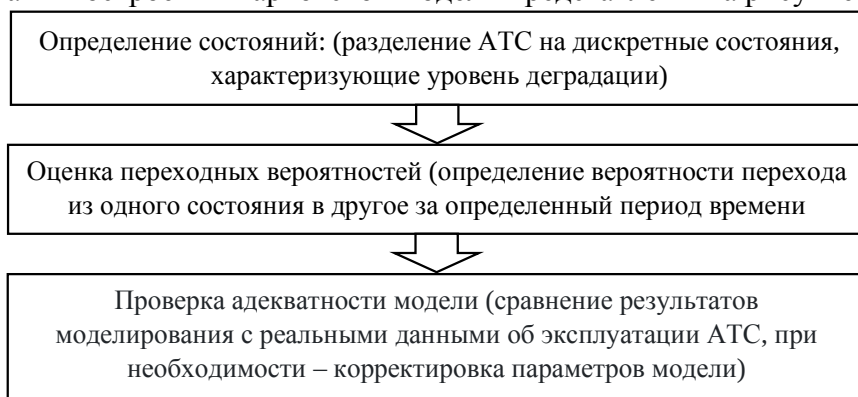


Рис. 2. Этапы построения марковской модели деградации АТС

Предлагается 7 состояний деградации АТС (табл. 2).

Выбор семи видов технического состояния представляет собой разумный компромисс между детализацией, практической применимостью и вычислительной сложностью. Однако, оптимальное количество и описание состояний может варьироваться в зависимости от конкретных условий эксплуатации, доступности данных и целей моделирования. Важно проводить тщательный анализ и обоснование выбора состояний для каждой конкретной задачи. Например, для грузовых автомобилей, работающих в тяжелых условиях, может потребоваться более детальная классификация состояний, учитывающая износ отдельных узлов и агрегатов (например, подвески, тормозной системы).

Табл. 2. Состояния деградации АТС

	Описание	Обоснование	Практическое значение
S_1 (Новое/ Идеальное)	Состояние новое или после капитального ремонта. Все системы работают в штатном режиме, износ минимален.	Отправная точка для моделирования процесса деградации. Характеризует максимальный ресурс и минимальные риски.	Определение базового уровня надежности и отправной точки для планирования ТО.
S_2 (Рабочее/ Незначительные отклонения):	Работоспособное состояние с первыми признаками износа Отклонения от номинальных параметров незначительны	Отражает начальный этап деградации, когда необходим мониторинг и контроль за состоянием АТС	Планирование дополнительных проверок и диагностических работ
S_3 (Срок планового ТО / Замена расходников)	Необходимо проведение планового ТО Требуется замена расходных материалов выполнение профилактических работ	Отражает необходимость проведения регламентных работ для поддержания работоспособности	Оптимизация сроков и объема планового ТО для минимизации затрат и простоя АТС.
S_4 (Умеренный износ/ Требуется мелкий ремонт)	Появляются более серьезные признаки износа (утечки масла, повышенный шум в двигателе, неисправности электрооборудования).	Отражает этап деградации, когда необходимы ремонтные работы для восстановления работоспособности АТС	Планирование и выполнение мелкого ремонта, заказ необходимых запасных частей
S_5 (Значительный износ/ Требуется серьезный ремонт):	Значительный износ основных узлов и агрегатов. Требуется проведение серьезного ремонта с заменой узлов и агрегатов.	Отражает критический этап деградации, когда требуется значительное вмешательство для восстановления работоспособности АТС.	Принятие решения о целесообразности проведения КР или замене АТС.
S_6 (Критический износ/ Требуется КР)	АТС находится в состоянии, требующем капитального ремонта с полной разборкой и заменой большинства узлов и агрегатов.	Отражает предельный этап деградации, когда затраты на восстановление АТС сопоставимы со стоимостью нового	Принятие окончательного решения о КР или списании АТС
S_7 (Предельное состояние/ Утилизация)	Предельное состояние АТС. Требуется утилизация АТС.	Отражает окончание жизненного цикла АТС.	Планирование вывода АТС из эксплуатации и замена его новым.

Математическая модель деградации на основе марковских процессов. Модель основана на марковской цепи с матрицей переходных вероятностей P . Вероятности p_{ij} перехода из состояния i в состояние j зависят от следующих эксплуатационных факторов: – наработка (N , тыс. км) – интенсивность эксплуатации (I_3) – качество топлива (Q_m) – тип используемого масла (O_m) – своевременность и качество ТО (Q_{TO}):

Для моделирования влияния этих факторов на переходные вероятности предлагается использовать следующие зависимости:

$$p_{ij} = p_{ijbase} \cdot K_N \cdot K_{I_{\mathcal{I}}} \cdot K_{Q_T} \cdot K_{O_M} \cdot K_{Q_{TO}}, \quad (1)$$

$$K_N = 1 + \alpha_N \cdot (N / N_r)^{\alpha_N}, \quad (2)$$

$$K_{I_{\mathcal{I}}} = 1 + a_{I_{\mathcal{I}}} \cdot (I_{\mathcal{I}} - 1), \quad (3)$$

$$K_{Q_T} = 1 + a_{Q_T} \cdot (Q_T - 1), \quad (4)$$

$$K_{O_M} = 1 + a_{O_M} \cdot (O_M - 1), \quad (5)$$

$$K_{Q_{TO}ij} = 1 - b_{ij} \cdot Q_{TO}. \quad (6)$$

Пример расчета зависимости для $p_{\{12\}}$ (переход из S_1 в S_2):

$$p_{12} = p_{12base} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot (N / 5)^{1.5}) \cdot (1 + a_2 \cdot (I_{\mathcal{I}} - 1)) \cdot (1 + a_3 \cdot (Q_T - 1)) \times \\ \times (1 + a_{4_M} \cdot (O_M - 1)) \cdot (1 - b_1 \cdot Q_{TO}), \quad (7)$$

где p_{ijbase} – базовые вероятности (определяются статистически); a_1, a_2, a_3, a_4, b_1 – коэффициенты чувствительности, характеризующие влияние эксплуатационных факторов на переходные вероятности.

Среднее время до наступления предельного состояния (R_{cp}) может быть рассчитано как сумма средних времен пребывания в состояниях S_1 - S_6 .

Методология расчета среднего ресурса до наступления предельного состояния включает:

1. Определение состояний (выбор состояния деградации АТС ($S_1 \dots S_7$)).
2. Определение переходных вероятностей (построение модели зависимостей p_{ij} от эксплуатационных факторов (наработка, интенсивность эксплуатации, качество топлива, тип масла, качество ТО)).
3. Построение матрицы переходов P (расчет матрицы P для конкретных условий эксплуатации).
4. Извлечение матрицы Q .
5. Вычисление $(I - Q)$ (вычесть матрицу Q из единичной матрицы I).
6. Вычисление обратной матрицы $(I - Q)^{(-1)}$ (если матрица обратима).
7. Расчет вектора R_{cp} (умножение вектора на обратную матрицу).
8. Суммирование элементов вектора R_{cp} (определение общего значения среднего времени до предельного состояния).

Для точного расчета R_{cp} необходимо решить систему линейных уравнений. Для расчета R_{cp} рассмотрим задачу нахождения среднего времени пребывания в состояниях S_1 - S_6 до достижения поглощающего состояния S_7 . Обозначим: R_{cpi} : среднее время до достижения состояния S_7 (предельного) начиная из состояния S_i .

Тогда можно записать следующие уравнения:

$$R_{CP1-7} = 1 + p_{11} \cdot R_{CP1} + p_{12} \cdot R_{CP2} + p_{13} \cdot R_{CP3} + p_{14} \cdot R_{CP4} + p_{15} \cdot R_{CP5} + p_{16} \cdot R_{CP6}, \quad (8)$$

$$R_{CP2-7} = 1 + p_{22} \cdot R_{CP2} + p_{23} \cdot R_{CP3} + p_{24} \cdot R_{CP4} + p_{25} \cdot R_{CP5} + p_{26} \cdot R_{CP6}, \quad (9)$$

$$R_{CP3-7} = 1 + p_{33} \cdot R_{CP3} + p_{34} \cdot R_{CP4} + p_{35} \cdot R_{CP5} + p_{36} \cdot R_{CP6}, \quad (10)$$

$$R_{CP4-7} = 1 + p_{44} \cdot R_{CP4} + p_{45} \cdot R_{CP5} + p_{46} \cdot R_{CP6}, \quad (11)$$

$$R_{CP5-7} = 1 + p_{55} \cdot R_{CP5} + p_{56} \cdot R_{CP6}, \quad (12)$$

$$R_{CP6-7} = 1 + p_{66} \cdot R_{CP6}. \quad (13)$$

Согласно системе уравнений, среднее время до достижения S_7 , начиная из состояния S_i , равно 1 (единице времени, проведенной в состоянии S_i) плюс взвешенная сумма средних времен до достижения S_7 из всех состояний, в которые можно перейти из S_i .

Перепишем систему в матричной форме.

Пусть $R_{CP} = R_{CP1}, R_{CP2}, R_{CP3}, R_{CP4}, R_{CP5}, R_{CP6}$ – вектор искомых значений.

Тогда систему можно записать как:

$$R_{CP} = [1,1,1,1,1,1] + R_{CP} \cdot Q, \quad (14)$$

где Q – матрица, полученная из матрицы переходных вероятностей P путем удаления последней строки и последнего столбца (соответствующих состоянию S_7), и транспонирования (фактически, берется верхний левый угол 6×6 , где значения остаются, а вне – все нули).

Перенесем члены и получим:

$$R_{CP} - R_{CP} \cdot Q = [1,1,1,1,1,1], \quad (15)$$

$$R_{CP} \cdot (I - Q) = [1,1,1,1,1,1], \quad (16)$$

где I – единичная матрица 6×6 .

Окончательно, решение для CP :

$$R_{CP} = [1,1,1,1,1,1] \cdot (I - Q)^{(-1)} \quad (17)$$

Разработанный алгоритм был реализован с использованием языка программирования Python 3.9 и библиотеки SciPy. Полученное значение R_{CP} является средним ожидаемым статистическим ресурсом АТС в заданных условиях. На рисунке 3 представлен пример зависимости R_{CP} АТС от наработки, интенсивности эксплуатации, качества топлива, и качества ТО.

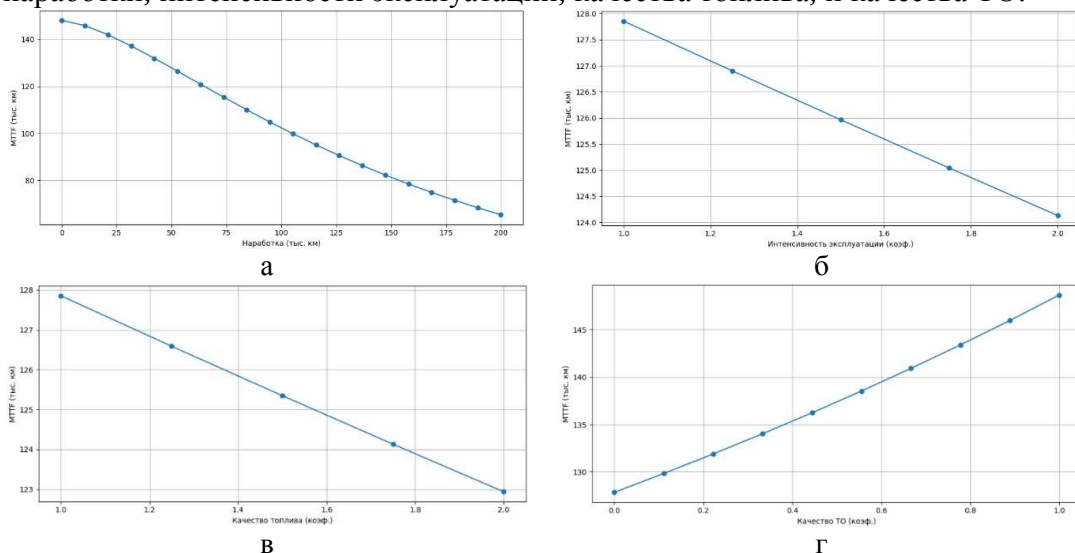


Рис. 3. Зависимости среднего ресурса от: а) наработки; б) интенсивности эксплуатации; в) качества топлива; г) качества ТО

Видно, что R_{cp} значительно снижается с увеличением наработки, отражая естественный процесс износа. Тяжелые условия эксплуатации (высокая I_3) резко снижают R_{cp} . Использование некачественного топлива и масла также сокращает R_{cp} . Высокое качество ТО (низкое Q_{TO}) значительно увеличивает R_{cp} , замедляя процесс деградации.

Обсуждение результатов и ограничения. Представленная методология позволяет комплексно оценить техническое состояние, прогнозировать остаточный ресурс и оптимизировать стратегии технического обслуживания, однако имеет ряд ограничений. Ограничения методологии: зависимость от качества исходных данных; упрощенное описание физических процессов; сложность учета всех эксплуатационных факторов; стационарность марковского процесса, проблема оценки стоимости ТО.

Традиционные подходы к планированию ТО (например, основанные на фиксированных интервалах) не учитывают индивидуальные особенности эксплуатации АТС, что приводит к неоптимальным затратам на обслуживание. Методы анализа на основе экспертных оценок субъективны и не позволяют количественно оценить влияние различных факторов. В отличие от этих подходов, предложенная методология обеспечивает более точный и объективный анализ деградационного изменения АТС, что позволяет оптимизировать стратегии ТО и повысить эффективность эксплуатации автотранспортного парка.

Заключение. Разработанная методология анализа деградационного изменения АТС позволяет комплексно оценить техническое состояние, прогнозировать остаточный ресурс и оптимизировать стратегии ТО. Учет индивидуальных особенностей эксплуатации, строгий учет статистики при определении переходных вероятностей, четкая система состояний повышает точность прогнозирования и позволяет принимать более обоснованные решения.

Представленная методология позволяет анализировать деградационное изменение АТС. Математическая модель дает возможность прогнозировать ресурс, оценивать влияние различных условий и принимать обоснованные решения по оптимизации технического обслуживания, что критически важно для эффективной эксплуатации любого автотранспортного парка.

Направления дальнейших исследований: адаптация модели к изменяющимся условиям эксплуатации; учет фактора квалификации персонала; проведение экспериментальной проверки и валидации модели; разработка программного обеспечения, автоматизирующего процесс сбора данных, построения модели и оптимизации стратегий ТО.

Список литературы

1. Костюков Ю.А., Чернова Т.А. О методологии научного исследования эффективности оценки деградационного изменения технических устройств // Иновации и инвестиции. – 2018. – №6. – С. 237-243.
2. Лисов А.А., Чернова Т.А., Горбунов М.С. Анализ моделей деградационного изменения технических устройств // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №12-1. – С. 79-83.

3. Микер У.К. Использование данных о деградации для анализа надежности изделий // Методы менеджмента качества. – 2009. – №4. – С. 49-54.
4. Копнов В.А. Оптимальное управление процессами деградации элементов механических систем: Монография. – Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2017. – 305 с.
5. Аюпов В.В. Математическое моделирование технических систем: учебное пособие. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2017. – 242 с.
6. Обжерин Ю.Е., Сидоров С.М., Федоренко С.Н. Полумарковская и скрытая марковская модели функционирования автономного ветродизельного комплекса // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – №4(28). – С. 70-82. – DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.005.
7. Чинючин Ю.М., Соловьев А.С. Применение марковских процессов для анализа и управления эксплуатационной технологичностью летательного аппарата // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2020. – Т. 23, №01. – С. 71-83. – DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-71-83.
8. Усов А.В., Кутяков Е.Ю. Применение марковских случайных процессов для информационного моделирования работы автотранспортных средств // Вестник ХНТУ. – 2014. – № 3(50). – С. 506-512.

References

1. Kostyukov Yu.A., Chernova T.A. On the Methodology of Scientific Research on the Effectiveness of Assessing the Degradation of Technical Devices // Innovations and Investments. 2018, no. 6, pp. 237-243.
2. Lisov A.A., Chernova T.A., Gorbunov M.S. Analysis of Models of Degradation Changes in Technical Devices // Modern High-Tech Technologies. 2019, no. 12-1, pp. 79-83.
3. Meeker W.K. Using degradation data to analyze product reliability // Quality Management Methods. 2009, no. 4, pp. 49-54.
4. Kopnov V.A. Optimal Control of Degradation Processes of Mechanical System Elements: Monograph. – Yekaterinburg: Publ. house of the RSVPU, 2017. – 305 p.
5. Ayupov V.V. Mathematical Modeling of Technical Systems: Textbook. – Perm: IPC "Prokrost", 2017. – 242 p.
6. Obzerin Yu.E., Sidorov S.M., Fedorenko S.N. Semi-Markov and Hidden Markov Models of the Autonomous Wind-Diesel Complex // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2022, no. 4(28), pp. 70-82. DOI: 10.38028/ESI.2022.28.4.005.
7. Chinyuchin Yu.M., Solovyov A.S. Application of Markov Processes for the Analysis and Management of Aircraft Operational Processability // Scientific Bulletin of MSTU GA. 2020, vol. 23, no. 01, pp. 71-83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-71-83.
8. Usov A.V., Kutyaikov E.Yu. Application of Markov Random Processes for Information Modeling of Vehicle Operation // Bulletin of KhNTU. 2014, no. 3(50), pp. 506-512.

Матвиенко Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации	Matvienko Sergey Anatolyevich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of motor transport, service and operation
Стрельник Юрий Николаевич – старший преподаватель кафедры Автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации	Strelnik Yuri Nikolaevich – senior lecturer at the Department of motor transport, service and operation
yu.strelnik@donnasa.ru	

Received 17.08.2025