ISSN 1999-4125 (Print) ISSN 2949-0642 (Online)

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
METHODS AND DEVICES FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT

Научная статья
УДК 519.248
DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-28-35

ЗНАЧИМОСТЬ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОПРОСАХ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Азизян Инара Артушовна

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета

*для корреспонденции: inara_azizyan@mail.ru

Аннотация.
Качественное решение задач прикидочной оценки и дальнейшего проектирования, контроля, диагностики и эксплуатации технической системы, на примере транспортных средств, способствует формированию профессиональной компетенции у выпускников политехнического вуза по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» и направления подготовки 23.03.03 «Автомобили и автомобильное хозяйство», в рамках изучения специальных глав математики. Изучение вопросов надежности транспортных средств, в ходе реализации учебного процесса, определяется улучшением качества подготовки специалистов в автомобильной отрасли и, как следствие, повышением качества и безопасности дорожного движения.
Автором обоснована значимость внедрения математических моделей, базирующихся на марковских процессах, в ходе контроля и диагностики технических систем, для прогнозирования критериев надежности технической системы: вероятности безотказной работы; интенсивности отказов и восстановления; времени простоя и непрерывной работы; средней наработки до первого отказа; стационарных значений коэффициента готовности системы и т.д.
Вопросы надежности технических систем автором рассматривались в единстве с математическим инструментарием; постановка и решение задач осуществлялась на основе теории графов, методов матричного исчисления решения систем линейных алгебраических уравнений, основных теорем теории вероятностей и математической статистики.
Представлен алгоритм реализации учебных междисциплинарных задач по контролю и диагностике технической системы; перечислены модели технических задач эксплуатации и обслуживания транспортных средств, реализуемых на основе марковских процессов; составлен перечень частных задач для поэтапного исследования технической системы; разобран пример составления и последующего решения системы линейных алгебраических уравнений для случая стационарного значения вероятности состояний.

Информация о статье
Поступила:
07 августа 2024 г.

Одобрена после рецензирования:
22 ноября 2024 г.

Принята к публикации:
02 декабря 2024 г.

Опубликована:
05 декабря 2024 г.

Ключевые слова:
Марковские процессы, критерии надежности, контроль, диагностика.

Для цитирования: Азизян И.А. Значимость Марковских процессов в вопросах контроля и диагностики технических систем // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 6 (166). С. 28-35. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-28-35, EDN: HRQSVO

Введение.

Во многих городах проблемой парков общественного транспорта является нехватка техники на маршрутных линиях вследствие нерабочего состояния большого количества транспортных единиц.

Анализируя финансово-экономические показатели, можно предположить, что прогнозирование процентного соотношения транспортных средств всего автопарка, готовых к работе, а также снижение вероятности единовременного выхода из строя большого процента транспортных единиц автопарка позволит оптимизировать работу автомобильного хозяйства[1].

Для обеспечения надежного функционирования транспортно-дорожного комплекса необходимо постоянно совершенствовать конструкцию и технологию производства машин и механизмов, разрабатывать и внедрять мероприятия по поддержанию работоспособности машин в эксплуатации.

Решать эти задачи призваны инженерные кадры, знакомые с теорией надежности машин и их диагностикой, и способные применять свои знания на практике [2].

Методика проведения исследования этапов контроля технической системы, прогнозирования состояния строится в интеграции с математическим инструментарием, в контексте усиления междисциплинарных связей [3,4].

Повышение уровня общей технической эрудиции студента, основанное на определенных знаниях о современных методах повышения эффективности как машиностроительной отрасли в целом, так и технологических разработок позволяет качественно проводить контроль и диагностику надежности технических систем [5,6].

Сформулируем частные учебные задачи для поэтапного исследования технической системы, решение которых способствует лучшему представлению о системном подходе по выявлению критериев надежности.

Основной целью внедрения математических моделей в процесс контроля и диагностики технических систем состоит в том, чтобы на этапе эксперимента по прикидочному расчету критериев надежности (испытав партию автомобилей, определенные узлы системы), можно было распространить результаты этих испытаний с допустимой вероятностью для каждого случая, на серийное применение этого технического объекта, эксплуатируемое в тех же условиях[7,8].

Модели, базирующиеся на марковских процессах, позволяют:

1) качественно спрогнозировать изучаемые показатели надежности до массовой эксплуатации и продолжить на этапе испытательной эксплуатации;

2) правильно выстраивать последовательность шагов диагностики технической системы и необходимых расчетов количественных характеристик надежности;

3) грамотно распределять роли в обслуживании транспортных средств;

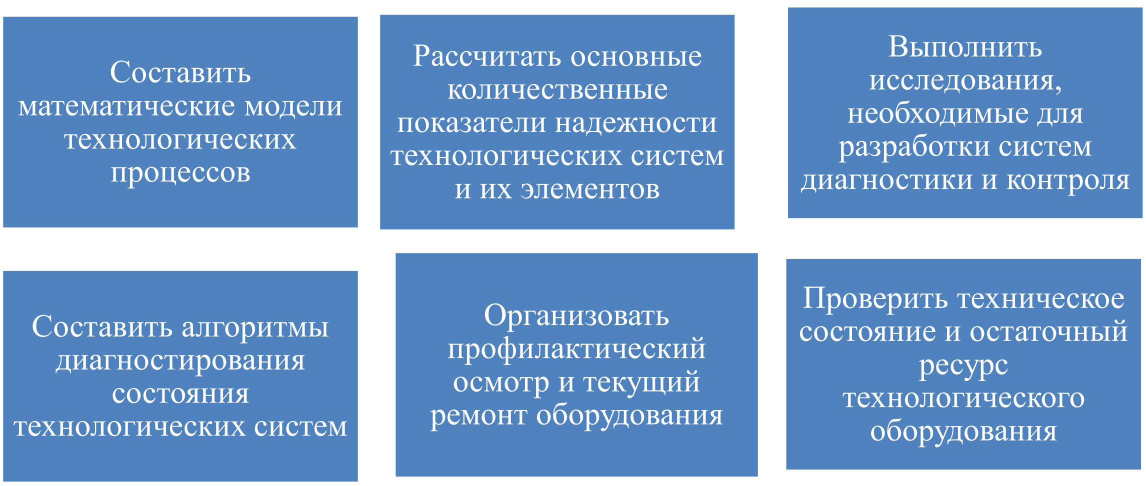

Рис. 1. Частные задачи для исследования технической системы
Fig. 1. Particular tasks for the study of a technical system

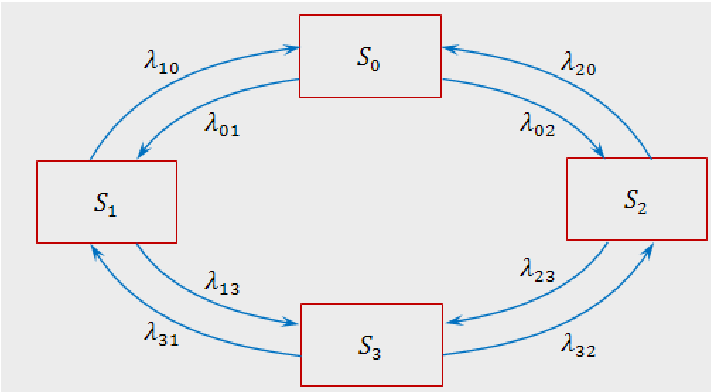

Рис. 2. Образец графа состояний технической системы
Fig. 2. A sample graph of the technical system states

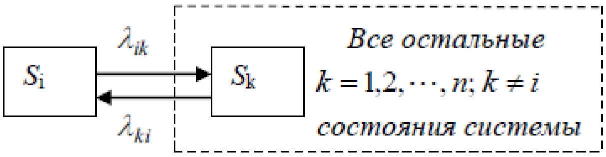

Рис. 3. Взаимосвязь элементов графа состояний технической системы
Fig. 3. The relationship of the elements of the graph of states of the technical system

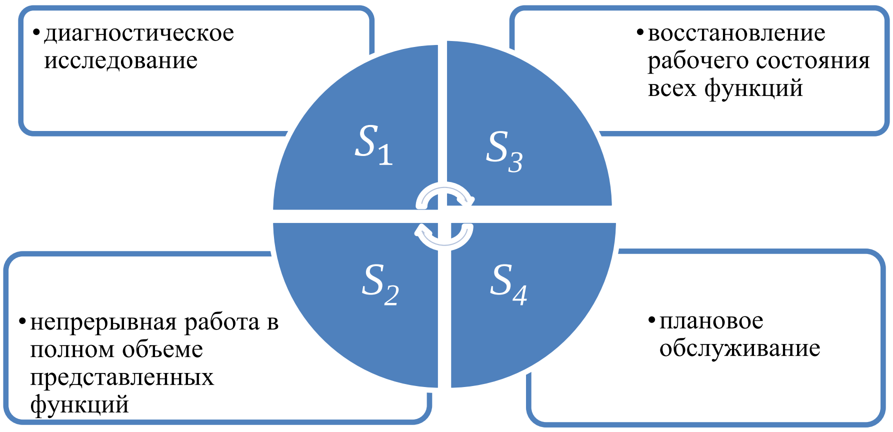

Рис. 4. Образец состояний технической системы
Fig. 4. A sample of the technical system states

4) снизить вероятность единовременного выхода из строя большого процента транспортных единиц автопарка [9].

Выделим некоторые частные задачи, решаемые с помощью алгоритма марковких процессов в обслуживании транспортных средств:

− фиксирование состояния автомобильных средств ежедневно;

− представление матрицы перехода состояний (работа, простой, ремонт, отказ и т.д.) за сутки, определение вероятности безотказной работы и отказа за определенный промежуток времени, коэффициента готовности и простоя системы;

− определение средней наработки до отказа;

− составление полного диагностического маршрута и прогнозирования работы в будущем.

Общую математическую модель для реализации поставленных частных задач можно представить в виде графа, где каждый элемент характеризует определенное состояние технической системы (например, работу, простой, ремонт, отказ и т.д.) [10,11].

Система уравнений, составленная на основе графа состояний, рассматривается относительно интенсивностей отказа и восстановления, вероятностей состояний или перехода из одного состояния в другое.

Можно представить взаимосвязь элементов графа состояний технической системы относительно интенсивностей переходов из

Таблица 1. Интенсивности вероятностей перехода
Table 1. Intensity of transition probabilities

λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	λ_{21}	λ_{32}	λ_{34}	λ_{41}
4	2	2	2	1	1	3

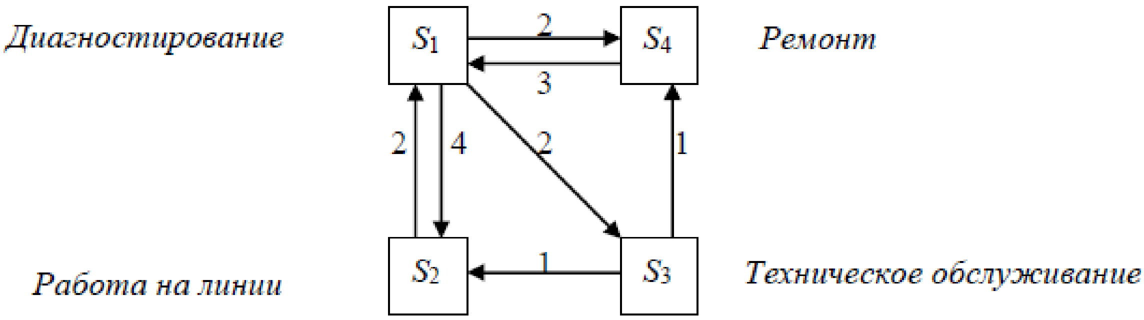

Рис. 4. Граф состояний
Fig. 4. The graph of states

одного состояния в другой в более компактной форме [14,15].

Допустим, техническая система находится в одном из четырех состояний, которые фиксируются в определенные промежутки времени и определяются соответствующим графом состояний.

Зная вероятности состояний в настоящее время и матрицу переходов из одного состояния в другое, можно спрогнозировать вероятность нахождения технической системы в каждом из представленных состояний в ближайшем будущем (через заранее фиксированные промежутки времени). Это могут быть разные временные промежутки в течение одного дня или на следующий день, на следующую неделю. Можно определить некоторые установившиеся значения функции вероятности безотказной работы от времени – стационарные значения (коэффициент готовности системы) [16,17].

Рассмотрим такие марковские функции S(t), которые принимают одно из n дискретных состояний и аргумент t (время) принимает любые значения на промежутке [0, +∞). Свойство марковости случайного процесса с непрерывным временем выражается в том, что он описывается системой дифференциальных уравнений первого порядка, и вероятности состояний в будущем определяются начальными условиями для вероятностей в данный момент времени [18].

При решении задач, связанных с марковскими процессами, используются уравнения Колмогорова, имеющие общий вид:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \left(-\sum_{k=1}^{n} \lambda_{ik}\right) P_i(t) + \sum_{k=1}^{n} \lambda_{ki} P_k(t), i = 1 \dots n.$$

При составлении уравнений учитываются исходящие потоки вероятностей из выбранного состояния во все другие и соответственно все входящие потоки вероятностей.

На практике легче рассматривать задачи с установившимся марковским процессом для случая постоянного значения вероятностей состояний. Тогда система дифференциальных уравнений вырождается в систему алгебраических уравнений, так как производные от постоянных значений вероятностей равны нулю [19].

Рассмотрим на конкретном примере алгоритм диагностирования состояния технологических систем. Для параметра оценки рассмотрим один из основных критериев надежности – вероятности состояний. Пусть автомобиль из парка автомобильного хозяйства находится в одном из четырех состояний: S_1-диагностирование, S_2 – работа на линии, S_3 – техническое обслуживание, S_4 – устранение неисправностей (ремонт) [20]. Предположим, что известны интенсивности вероятностей перехода λ_{ij}.

Для полного представления переходов системы из одного состояния в другое составим граф состояний парка автомобилей.

Следующий этап – составление системы уравнений для вероятностей состояний в стационарном режиме, при условии, когда вероятности принимают постоянные значения. Полученную систему линейных алгебраических уравнений целесообразно решать с помощью метода Гаусса из-за возможного большого количества уравнений, которые составляются в соответствии с числом состояний технической системы.

При допущении, что вероятности принимают постоянные значения, производные от вероятностей равны нулю. Тогда уравнения Колмогорова примут вид:

$$\left(-\sum_{k=1}^{n} \lambda_{ik}\right) P_i(t) + \sum_{k=1}^{n} \lambda_{ki} P_k(t) = 0, i = 1 \dots n.$$

Соответствующая система линейных алгебраических уравнений примет вид:

$$\begin{cases} -(\boldsymbol{\lambda}_{12}+\boldsymbol{\lambda}_{13}+\boldsymbol{\lambda}_{14})\mathbf{p}_1+\boldsymbol{\lambda}_{21}\mathbf{p}_2+\boldsymbol{\lambda}_{41}\mathbf{p}_4=\mathbf{0}, \\ -\boldsymbol{\lambda}_{21}\mathbf{p}_2+\boldsymbol{\lambda}_{12}\mathbf{p}_1+\boldsymbol{\lambda}_{32}\mathbf{p}_3=\mathbf{0}, \\ -\boldsymbol{\lambda}_{32}\mathbf{p}_3-\boldsymbol{\lambda}_{34}\mathbf{p}_3+\boldsymbol{\lambda}_{13}\mathbf{p}_1=\mathbf{0}, \\ -\boldsymbol{\lambda}_{41}\mathbf{p}_4+\boldsymbol{\lambda}_{14}\mathbf{p}_1+\boldsymbol{\lambda}_{34}\mathbf{p}_3=\mathbf{0}. \end{cases}$$

Решая данную систему линейных алгебраических уравнений, мы получим числовые характеристики критериев надежности, необходимых для контроля и диагностики технической системы.

Предположим, что в случайно выбранный момент времени вероятность состояний системы определяется вектор-строкой $P(t_i) = (0{,}2 \quad 0{,}5 \quad 0{,}2 \quad 0{,}1)$, а вероятность переходов из одного состояния в другое – матрицей $\bar{P}(t_i) = \begin{pmatrix} 0 & 0{,}6 & 0{,}2 & 0{,}2 \\ 0{,}2 & 0{,}5 & 0{,}2 & 0{,}1 \\ 0{,}2 & 0{,}4 & 0{,}2 & 0{,}2 \\ 0 & 0{,}4 & 0 & 0{,}6 \end{pmatrix}$.

Если задать шаг процесса как один день, то можно определить вероятность поведения технической системы на следующий день.

Так как необходимо учитывать оба фактора (и вероятность состояния и вероятность переходов), то рассмотрим произведение матриц.

$$(0{,}2\ 0{,}5\ 0{,}2\ 0{,}1)\cdot\begin{pmatrix} 0 & 0{,}6 & 0{,}2 & 0{,}2 \\ 0{,}2 & 0{,}5 & 0{,}2 & 0{,}1 \\ 0{,}2 & 0{,}4 & 0{,}2 & 0{,}2 \\ 0 & 0{,}4 & 0 & 0{,}6 \end{pmatrix} =$$

$(0{,}14 \quad 0{,}49 \quad 0{,}18 \quad 0{,}19)$.

Можно прогнозировать, что система будет находиться: на диагностике с вероятностью 14%; в состоянии непрерывной работы в полном объеме представленных функций – 49 %; в состоянии планового технического обслуживания с вероятностью 18%; на ремонте для восстановления рабочего состояния всех функций – 19 %. Четыре состояния представляют собой несовместные события, образующую полную группу. Для контроля сумма вероятностей всех состояний должна стремиться к единице.

Аналогично можно проследить и вероятность состояний на последующие дни, каждый следующий шаг зависит от предыдущего, так как марковский процесс – случайный процесс, эволюция которого после любого заданного значения функции времени не зависит от процесса перехода предшествующего значения, то есть представляет собой череду событий, где каждое последующее событие зависит от предыдущего через настоящее.

Составим систему уравнений для вероятностей состояний:

$$\begin{cases} -(4+2+2)P_1+2P_2+3P_4=0, \\ 4P_1-2P_2+P_3=0, \\ 2P_1-(1+1)P_3=0, \\ 2P_1+P_3-3P_4=0, \\ P_1+P_2+P_3+P_4=1. \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} -8P_1+2P_2+3P_4=0, \\ 4P_1-2P_2+P_3=0, \\ 2P_1-2P_3=0, \\ 2P_1+P_3-3P_4=0, \\ P_1+P_2+P_3+P_4=1. \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} -8P_1+2P_2+3P_4=0, \\ 4P_1-2P_2+P_3=0, \\ P_1-P_3=0, \\ 2P_1+P_3-3P_4=0, \\ P_1+P_2+P_3+P_4=1. \end{cases}$$

Решим систему, преобразуя строки расширенной матрицы системы с помощью элементарных преобразований.

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2/11 \end{array}\right) \boxed{1}\ \boxed{-1} \sim \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 9/11 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2/11 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2/11 \end{array}\right) \boxed{-2}\ \boxed{1} \sim$$

$$\sim \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 2/11 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 5/11 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2/11 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2/11 \end{array}\right).$$

Свободные элементы расширенной матрицы ─ финишные вероятности состояний [20].

Выводы. Исследование состояний технической системы на основе математического аппарата создает возможности для получения, развития и практической реализации инженерных навыков обучающимися.

Этому способствует работа поэтапной реализации алгоритма исследования диагностики и контроля системы, представленной в данной статье: формулирование технической задачи; составление соответствующей математической модели; представление основных связей переходов вероятностей и других числовых характеристик критериев надежности на основе графов; составление системы уравнений или других математических зависимостей; получение числовых значений вероятностей состояний и переходов из одного состояния в другое.

Сформулированы основные задачи в ходе эксплуатации и обслуживания транспортных средств, реализация которых возможна на основе марковских процессов.

Представлены частные задачи для поэтапного исследования технической системы, которые можно адаптировать в любой отрасли.

Для лучшего усвоения всех переходов представлено подробное решение учебной задачи по реализации всех этапов исследования контроля и диагностики работы на линии автотранспортного средства. Фиксировать состояние автомобильных средств ежедневно, представлять матрицу перехода состояний (работа, простой, ремонт, отказ и т.д.) за сутки, определить вероятность безотказной работы и отказа за определенный промежуток времени, коэффициент готовности и простоя системы, среднюю наработку до отказа, составление полного диагностического маршрута и прогнозирования работы в будущем – вот вопросы, которые решаются с помощью алгоритма марковских процессов.

Таким образом, изучение специальных дисциплин в контексте междисциплинарной связи с дисциплинами математического цикла, способствует лучшему пониманию и последующему решению технических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречихин, Н.С., Булычев, Д.И., Азизян, И.А. Математические методы контроля и диагностики состояния автомобильного хозяйства/Н.С. Гречихин, Д.И. Булычев, И.А. Азизян// В сборнике: Наука, техника, педагогика высшей школы. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Москва, 2022, с. 34-38.
2. Яхьяев, Н.Я, Кораблин, А.В. Основы теории надежности: учебник для студ. Учреждений высш. проф. образование. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. . – 208 с.
3. Азизян, И.А., Миронова, Е.И. Значимость изучения марковских процессов в ходе исследования математических моделей технической системы на этапах диагностирования и ремонта/И.А. Азизян, Е.И. Миронова//Ремонт. Восстановаление. Модернизация, 2022, №11, с. 16-19.
4. Потапова, Н.В. Педагогическая наука о проблеме развития надпрофессиональных навыков студентов / Потапова Н.В., Панина Т.С. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. № 2, С.93-98.
5. Кушнарев, Л. И. К стабильно высокому качеству продукции машиностроения / Л. И. Кушнарев, Д. Л. Севостьянова // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2022. – № 2. – С. 32-36.
6. Управление качеством ремонта. Подготовка специалистов / Н. В. Бышов, Н. Р. Кузелев, Г. А. Нуждин, Г. К. Рембалович // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 9. – С. 37-43
7. Половко, А.М., Гуров, С.В. Основы теории надежности. Практикум. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
8. Ушаков, И.А. Курс теории надежности систем: учеб. пособие для вузов/И.А. Ушаков. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.
9. Беляев, Ю.К. Богатырев, В.А., Болотин, В.В. Надежность технических систем. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
10. Гнеденко, Б.В., Беляев, Ю.К., Соловьев, А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
11. Алон, Н. Спенсер, Д. Вероятностный метод: учеб. пособие. – М.: Бином, 2011. – 320 с.
12. Ушаков, И.А. Курс теории надежности систем. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.
13. Острейковский, В.А. Теория надежности. – М.: Высш.шк., 2003. – 463 с.
14. Письменный, Д.Т. Конспект лекций по теории вероятностей, математической статистике и случайным процессам. – М.: Айрис-Пресс, 2007. – 288 с.
15. Хрипунова, М.Б. Высшая математика: учебник и практикум для вузов. – Москва: Издательство Юрайт, 2020. – 478 с.
16. Асаева, Т.А. Руководство к выполнению лабораторных работ на ПК по математическим основам теории надежности. – Рязань.: Рязанский институт (ф) МГОУ, 2022. – 64 с.
17. Зайковский, В. Э. Автоматизация процесса управления рисками – важный шаг к цифровизации принятия управленческих решений / В. Э. Зайковский, А. В. Карев // Проблемы анализа риска. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 52-59.
18. Судаков, Р.С. Испытания технических систем. — М.: Машиностроение, 2014. – 272 с.
19. Дорохов, А.Н., Керножицкий, В.А., Миронов, А.Н. Шестопалова, О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. – СПб.: «Лань», 2012. – 352 с.
20. Владимиров, А.Ф. Рабочая тетрадь по приложению теории случайных функций к технической эксплуатации автомобилей [Электронный ресурс] / А.Ф. Владимиров. – Рязань, 2015. – 50 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Азизян Инара Артушовна, кандидат педагогических наук, доцент, Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, 390000, д. 26/53.

Заявленный вклад авторов:

Азизян Инара Артушовна : постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

THE IMPORTANCE OF MARKOV PROCESSES IN THE CONTROL AND DIAGNOSTICS OF TECHNICAL SYSTEMS

Inara A. Azizyan

Ryazan Institute (branch) Moscow Polytechnic University

*for correspondence: inara_azizyan@mail.ru

Article info
Received:
07 August 2024

Accepted for publication:
22 November 2024

Accepted:
02 December 2024

Published:
05 December 2024

Keywords: *Markov processes, reliability criteria, control, diagnostics.*

Abstract.
A qualitative solution to the problems of estimated assessment and further design, control, diagnostics and operation of a technical system, using the example of vehicles, contributes to the formation of professional competence among graduates of a polytechnic university in the specialty 23.05.0 «Land transport and technological means» and the training area 23.03.03 «Automobiles and automotive industry», within the framework of studying special chapters of mathematics. The study of vehicle reliability issues, during the implementation of the educational process, is determined by improving the quality of training specialists in the automotive industry and, as a result, improving the quality and safety of road traffic.
The author substantiates the importance of introducing mathematical models based on Markov processes in the course of monitoring and diagnostics of technical systems to predict the reliability criteria of a technical system: the probability of failure-free operation; failure rate and recovery; downtime and continuous operation; average operating time before the first failure; stationary values of the system availability coefficient, etc.
The issues of reliability of technical systems were considered by the author in unity with mathematical tools; the formulation and solution of problems was carried out on the basis of graph theory, matrix calculus methods for solving systems of linear algebraic equations, basic theorems of probability theory and mathematical statistics.
An algorithm for the implementation of interdisciplinary educational tasks for the control and diagnosis of a technical system is presented; models of technical tasks for the operation and maintenance of vehicles implemented on the basis of Markov processes are listed; a list of specific tasks for a step-by-step study of a technical system is compiled; an example of the compilation and subsequent solution of a system of linear algebraic equations for the case of a stationary value of the probability of states is analyzed.

For citation: Azizyan I.A. The importance of Markov processes in the control and diagnostics of technical systems. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 6(166):28-35. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-28-35, EDN: HRQSVO

REFERENCES

1. Grechikhin, N.S., Bulychev, D.I., Azizyan, I.A. Mathematical methods of control and diagnostics of the state of the automotive industry/N.S. Grechikhin, D.I. Bulychev, I.A. Azizyan// In the collection: Science, technology, pedagogy of higher education. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Moscow, 2022, p. 34-38.
2. Yahyaev, N.Ya, Korablin, A.V. Fundamentals of reliability theory: textbook for students. Higher education institutions. Prof. education. – M.: Publishing center "Academy", 2014. – 208 p.
3. Azizyan, I.A., Mironova, E.I. The importance of studying Markov processes during the study of mathematical models of a technical system at the stages of diagnosis and repair/I.A. Azizyan, E.I. Mironova//Repair. Restoration. Modernization, 2022, № 11, p. 16-19.
4. Potapova, N.V. Pedagogical science on the problem of developing students' supra-professional skills / Potapova N.V., Panina T.S. // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2021. № 2, p.93-98.
5. Kushnarev, L. I. Towards consistently high quality of mechanical engineering products / L. I. Kushnarev, D. L. Sevostyanova // Repair. Recovery. Modernization. - 2022. – № 2. – p. 32-36.
6. Repair quality management. Training of specialists / N. V. Byshov, N. R. Kuze-lev, G. A. Nuzhdin, G. K. Rembalovich // Repair. Recovery. Modernization. – 2019. – № 9. –p. 37-43
7. Polovko, A.M., Gurov, S.V. Fundamentals of reliability theory. The workshop. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2006. – 560 p.

8. Ushakov, I.A. Course of the theory of reliability of systems: textbook. handbook for universities/I.A. Ushakov. – M.: Bustard, 2008. – 239 p
9. Belyaev, Y.K. Bogatyrev, V.A., Bolotin, V.V. Reliability of technical systems. – M.: Radio and Communications, 1985. – 608 p.
10. Gnedenko, B.V., Belyaev, Yu.K., Solovyov, A.D. Mathematical methods in the theory of reliability. – M.: Nauka, 1965. – 524 p.
11. Alon, N. Spencer, D. Probabilistic method: textbook. the manual. – M.: Binom, 2011. – 320 p.
12. Ushakov, I.A. Course of the theory of reliability of systems. – M.: Bustard, 2008. – 239 p.
13. Ostreikovsky, V.A. Theory of reliability. – M.: Higher School, 2003. – 463 p.
14. Written, D.T. Lecture notes on probability theory, mathematical statistics and random processes. – M.: Iris Press, 2007. – 288 p.
15. Khripunova, M.B. Higher mathematics: textbook and workshop for universities. – Moscow: Yurait Publishing House, 2020. – 478 p.
16. Asaeva, T.A. A guide to performing laboratory work on a PC on the mathematical foundations of reliability theory. – Ryazan.: Ryazan Institute (f) Moscow State University, 2022. – 64 p.
17. Zaikovsky, V. E. Automation of the risk management process is an important step towards digitalization of managerial decision–making / V. E. Zaikovsky, A.V. Karev // Problems of risk analysis. - 2021. – Vol. 18. – 11. Alon, N. Spencer, D. Probabilistic method: textbook. the manual. – M.: Binom, 2011. – 320 p.
12. Ushakov, I.A. Course of the theory of reliability of systems. – M.: Bustard, 2008. – 239 p.
13. Ostreikovsky, V.A. Theory of reliability. – M.: Higher School, 2003. – 463 p.
14. Written, D.T. Lecture notes on probability theory, mathematical statistics and random processes. – M.: Iris Press, 2007. – 288 p.
15. Khripunova, M.B. Higher mathematics: textbook and workshop for universities. – Moscow: Yurait Publishing House, 2020. – 478 p.
16. Asaeva, T.A. A guide to performing laboratory work on a PC on the mathematical foundations of reliability theory. – Ryazan.: Ryazan Institute (f) Moscow State University, 2022. – 64 p.
17. Zaikovsky, V. E. Automation of the risk management process is an important step towards digitalization of managerial decision–making / V. E. Zaikovsky, A.V. Karev // Problems of risk analysis. - 2021. – Vol. 18. – № 2. – pp. 52-59.
18. Sudakov, R.S. Tests of technical systems. –– M.: Mechanical Engineering, 2014. – 272 p.
19. Dorokhov, A.N., Kernozhitsky, V.A., Mironov, A.N. Shestopalova, O.L. Ensuring the reliability of complex technical systems. – St. Petersburg: "Lan", 2012. – 352 p.
20. Vladimirov, A.F. Workbook on the application of the theory of random functions to the technical operation of cars [Electronic resource] / A.F. Vladimirov. – Ryazan, 2015. – 50 p.

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:
Inara A. Azizyan, C. Sc. in Pedagogy, Associate Professor, e-mail: inara_azizyan@mail.ru, Ryazan Institute (branch) Moscow Polytechnic University, Ryazan, Pravo-Lybedskaya str., 390000, 26/53.

Contribution of the authors:
Inara A. Azizyan – setting a research task, reviewing relevant literature, collecting and analyzing data, conclusions, writing a text.

All authors have read and approved the final manuscript.