Тип статьи: научная
УДК 004.942:629.3.083
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-3-87-93

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОСТИ РЕМОНТА АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Дмитрий Николаевич Смирнов [1], Светлана Александровна Чернопятова [2], Алексей Иванович Малютин [3], Сергей Юрьевич Панов [4]
[1,2,3] ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия
[4]Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия
[3]malyutin-1980@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Алексей Иванович Малютин, malyutin-1980@mail.ru
Corresponding author: Aleksej Malyutin, malyutin-1980@mail.ru

Реферат. *В поставленной задаче моделирования предлагается использование вероятностного подхода. Рассматривается нескольких повторяемых групп однотипных операций - поиск причины отказа и его устранение. По опыту предшествующих ремонтов однотипных узлов автомобиля заданы ряды распределения значений P_m (вероятность ремонта определенных узлов) и P_n (вероятность отказа определенных узлов). В модели учитываются квалификация инженеров и техников станции технического обслуживания, наличие и возможности подвижных и стационарных средств контроля и ремонта. После определения вероятности правильной диагностики неисправностей и планирования определенного алгоритма операций технического обслуживания оперативность ремонта оценивается как соотношение вероятностей выполнения ремонта за заданное время и среднего времени ремонта. Искомая плотность вероятности, учитывая многофазный характер процесса определяется методом многократной свертки. Полученная модель позволяет решить две взаимообратные задачи. Во-первых, определить оптимальное время ремонта при условии оснащения средствами диагностики и ремонта, также квалификации технических работников. Во-вторых, при заданном времени ремонта определить требуемые характеристики диагностического оборудования, средств обслуживания и персонала.*

Ключевые слова: *моделирование, техническое обслуживание, ремонт, диагностика, надежность технических систем.*

MATHEMATICAL MODEL OF THE EFFICIENCY OF REPAIR OF AUTOMOTIVE EQUIPMENT

Dmitry Smirnov [1], Svetlana Chernopjatova [2], Aleksej Malyutin [3], Sergej Panov [4]
[1,2,3]Air force Academy named after Professor N. E Zhukovsky and Y. A. Gagarin, Voronezh, Russia
[4]Voronezh state technical university, Voronezh, Russia
[3]malyutin-1980@mail.ru

Abstract. *The use of a probabilistic approach is proposed in the modeling task. Several repeatable groups of the same type of operations are considered - the search for the cause of failure and its elimination. Based on the experience of previous repairs of the same type of car components, the distribution series of values Pm (probability of repair of certain nodes) and Pn (probability of failure of certain nodes) are set. The model takes into account the qualifications of engineers and technicians of the service station, the availability and capabilities of mobile and stationary monitoring and repair facilities. After determining the probability of correct troubleshooting and planning a certain algorithm of maintenance operations, the repair efficiency is estimated as the ratio of the probabilities of performing repairs for a given time and the average repair time. The desired probability density, given the*

multiphase nature of the process, is determined by the method of multiple convolution. The resulting model allows us to solve two reciprocal problems. Firstly, to determine the optimal repair time, provided that diagnostic and repair tools are equipped, as well as the qualifications of technical workers. Secondly, at a given repair time, determine the required characteristics of diagnostic equipment, maintenance facilities and personnel.

Keywords: *modeling, maintenance, repair, diagnostics, reliability of technical systems.*

Для цитирования: Смирнов Д.Н., Чернопятова С.А., Малютин А.С., Панов С.Ю. Математическая модель оперативности ремонта автомобильной техники // Наука в Центральной России. 2023. Т. 63, № 3. С. 87-93. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-3-87-93.

For citation: Smirnov D, Chernopjatova S., Malyutin A., Panov S. Mathenatical model of the efficiency of repair of automotive equipment. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 63(3): 87-93. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-3-87-93.

Введение. В настоящее время техническое обслуживание является трудоемкой и дорогостоящей сферой деятельности. На долю технического обслуживания и ремонта автомобилей приходится 25..30% общей суммы эксплуатационных расходов автотранспортных предприятий. При этом финансовые затраты предприятий на текущий ремонт и обслуживание с учетом затрат на запасные составляет ежегодно от 6 до 10% от стоимости транспортного парка предприятия.

Эффективность технической эксплуатации машин зависит от многих факторов. К числу основных из них относятся: уровень конструктивно-эксплуатационных свойств (надежность и эксплуатационная технологичность), совершенство методов и средств технической эксплуатации, качество подготовки персонала, глубина проработки и научного обоснования программ технического обслуживания и ремонта и совершенство организации процесса технической эксплуатации.

Для организации технического обслуживания и эксплуатации любого технического объекта и его составных частей, в том числе такого сложного, как автомобиля, необходимо уметь оценивать его текущее состояние, которое непрерывно изменяется под влиянием внешних и внутренних возмущающих факторов. Знание состояния объекта позволяет использовать его оптимальным образом, осуществлять ремонт в кратчайшие сроки и тем самым повысить долговечность.

При технической эксплуатации автомобиля важнейшим элементом является правильная организация технического обслуживания и ремонта.

В настоящее время основой для ведения автомобильного хозяйства является система планово-предупредительных ремонтов, основанная на техническом обслуживании по наработке агрегатов автомобиля. Регламентный работы по техническому обслуживанию и ремонту проводятся в строго определенные периоды (как правило равные) и предусматривают вывод в эти сроки автомобиля из эксплуатации. Однако случайный характер условий эксплуатации вносит коррекцию в обеспеченную при проектировании вероятность безотказной работы и соответствующее этому техническое состояние конкретного объекта. Повышение надежности при прогнозировании обеспечения наихудших условий эксплуатации связано с большими материальными затратами из-за недоиспользования технического ресурса основной массы объектов и их элементов, находящихся в эксплуатации. Кроме того, полные и частичные разборки агрегатов с целью их дефектации сами по себе вносят изменения в их структуры, что может привести к увеличению вероятности отказов после ремонтов.

Техническое обслуживание и ремонт по фактическому состоянию объекта являются перспективной системой, предусматривающей эксплуатацию технического объекта с контролем параметров до предотказного состояния.

Для ффективного применения этой системы необходимо разрабатывать способы обнаружения (т.е. методы технической диагностики) неисправностей, которые позволили прекратить эксплуатацию объекта при определенной высокой степени вероятности возникновения отказа. Такая ситуация может быть определена при непрерывном контроле за значениями параметров, характеризующих работоспособность объекта.

Организация технической диагностики представляет собой комплекс действий, среди которых следует назвать разработку методологических основ процесса, выбор и создание технологических средств диагностики, решение организационных вопросов самою процесса.

При разработке методологических основ решаются различные задачи, в том числе:

– выбор стратегии (методики) диагностики;
– выбор вида информации о техническом состоянии объекта и определение достоверности такой информации;
– выбор или разработка способов получения такой информации;
– разработка модели оценки технического состояния (математической модели объекта);
– разработка методики принятия решения.

Ошибочное решение может привести к недоиспользованию потенциального срока службы детали или узла или к возрастанию вероятности отказа в межремонтный период.

Техническое обслуживание с контролем параметров требует непрерывного анализа результатов эксплуатации с целью обеспечения оперативного реагирования на изменение качественных характеристик, проведение настроечных и регулировочных работ, соответствующего ремонта или замены агрегатов и т.д. Для этого должны быть спланированы и осуществлены мероприятия по созданию необходимых условий для ремонта: созданы производственные мощности по ремонту, обеспечен запас запасных частей и т.п.

Основной задачей, которая возникает при разработке такой системы, является рациональное распределение объемов ремонтных работ и реализация алгоритма, обеспечивающего требования надежности с минимальными затратами времени и средств на ремонт машины.

Поддержание требуемого уровня готовности автомобильной техники сельскохозяйственного назначения (АТСН) в период её сезонного применения обеспечивается качественным и своевременным восстановлением работоспособности в результате отказов и повреждений под воздействием интенсивной эксплуатации в неблагоприятных погодных и операциональных условиях. В этом случае поврежденная или отказавшая автомобильная техника, передаются в станции технического обслуживания, где происходит его ремонт. От своевременности и оперативности осуществления всего комплекса ремонтных мероприятий в периоды интенсификации сезонных сельскохозяйственных работ, в значительной степени, влияет их полное и качественное выполнение.

Цель моделирования – получение аналитических зависимостей вероятностно-временных характеристик оперативности ремонта от показателей оснащенности средствами диагностического контроля и ремонта и квалификации инженерно-технического персонала.

Постановка задачи.

В общем случае ремонт АТСН состоит из нескольких M повторяемых групп однотипных операций [1]. В каждой группе устраняется один из отказов. Значение параметра M определяется эксплуатационно-техническими характеристиками АТСН и характером причины вызвавшей его отказ (старение, повреждения, нарушения условий эксплуатации и т.д.) [2]. Любая m-ая ($1 \le m \le M$) группа представляет две последовательно выполняемые операции: поиск причины отказа и его устранение. При поиске каждого отказа инженерами станции технического обслуживания проверяются N гипотез о возможных причинах его возникновения [3, 4]. Очевидно, что значения параметров M и N для каждого события случайны. Поэтому считается, что априори по опыту предшествующих ремонтов однотипных узлов автомобиля заданы ряды распределения значений P_m и P_n, при этом

$$\sum_{m=1}^{M} P_m = 1, \quad \sum_{n=1}^{N} P_n = 1.$$

По аналогичным соображениям также случайны длительности операций проверки каждой из n гипотез ($1 \le n \le N$) t_1 и устранения неисправности t_2, а их возможные значения характеризуются априорными плотностями вероятности $\varphi(t_1)$ и $\psi(t_2)$.

Квалификация инженеров станции технического обслуживания и возможности подвижных и стационарных средств контроля и ремонта определяют значение N, виды распределения P_n, $\varphi(t_1)$ и $\psi(t_2)$ следующим образом:

$$N^{(A)} < N^{(Б)},$$
$$P_{n=n0}{}^{(A)} < P_{n=n0}{}^{(Б)},$$
$$\int_0^t \varphi^{(A)}(t_1)dt_1 > \int_0^t \varphi^{(Б)}(t_1)dt_1,$$
$$\int_0^t \psi^{(A)}(t_2)dt_2 > \int_0^t \psi^{(Б)}(t_2)dt_2$$

где индекс «А» при N, P_n, $\varphi(t_1)$ и $\psi(t_2)$ соответствует более высокой квалификации инженеров станции технического обслуживания или (и) использованию более совершенных подвижных и стационарных средств контроля и ремонта, а индекс «Б» - противным случаям.

Оперативность ремонта оценивается по показателям: вероятность выполнения ремонта за заданное время $P(t \le t_0)$ и среднее время ремонта $\bar{t}$.

Требуется определить зависимость $P(t \le t_0)$ и $\bar{t}$ от числовых характеристик M, N, Pm, Pn, $\varphi(t_1)$ и $\psi(t_2)$.

Решение задачи.

Пусть $W_m(t)$ – плотность вероятности времени устранения m неисправностей изделия, а $W_1(t)$ - плотность вероятности времени устранения одной неисправности. Тогда, учитывая случайный характер параметра M, вероятность $P(t \le t_0)$ и среднее время ремонта $\bar{t}$ находятся как [5,6]

$$P(t \le t_0) = \int_0^{t_0} \sum_{m \in M} P_m W_m(t)dt, \tag{1}$$

$$\bar{t} = \int_0^{t_0} t \sum_{m \in M} P_m W_m(t)dt. \tag{2}$$

Выражения (1) и (2) являются следствием формулы полной вероятности, с помощью которой определена вероятность выполнения каждой гипотезы $H_m(Y=m)$ о числе возникших неисправностей ремонтируемого изделия. В свою очередь, учитывая многофазный характер процесса последовательного устранения неисправностей изделия, плотность вероятности $W_m(t)$ является результатом m-кратной свертки $W_i(t)$ [7]

$$W_m(t) = \int_0^{\infty} W_1(t-\tau_m)\cdot W_1(\tau_m)d\tau_m \times \ldots \times \tag{3}$$
$$\times \int_0^{\infty} W_1(\tau_2-\tau_1)\cdot W_1(\tau_1)d\tau_1.$$

По аналогии с учетом многофазного и случайного по времени и событиям характера процесса поиска причины возникновения каждой неисправности и ее устранения следует

$$W_1(t_1) = \int_0^{\infty} \varpi(t-t_2)\cdot \psi(t_2)dt_2, \tag{4}$$

$$\omega(t_1) = \sum_{n \in N} P_n \varphi_n(t_1), \tag{5}$$

$$\varphi_m(t_1) = \int_0^{\infty} \varphi(t-\tau_n)\cdot \varphi(\tau_n)d\tau_n \times \ldots \times \int_0^{\infty} \varphi(\tau_2-\tau_1)\cdot \varphi(\tau_1)d\tau_1, \tag{6}$$

где $\omega(t_1)$ – плотность вероятности времени поиска причины неисправности на множестве n возможных гипотез о причинах ее возникновения;

$\varphi(t_1)$ – плотность вероятности времени последовательной проверки n гипотез о возможных причинах ее возникновения.

Соотношения (1)…(6) являются искомой математической моделью для определения $P(t \le t_0)$ и $\bar{t}$ как функций числовых характеристик $M, N, P_m, P_n, \varphi(t_1), \psi(t_2)$.

Анализ полученных решений. Рассматриваются следующие условия моделирования процесса ремонта. Считается, что процессы поиска причины каждой неисправности и их устранения статистически однотипны и подчиняются показательным распределениям с параметрами a_1 и a_2 соответственно. Принимается, что поиск причины каждой неисправности имеет вид процесса независимых испытаний гипотез об их причинах и поэтому $P_n = \alpha(1-\alpha)^{n-1}$, $\alpha=1/N$. Распределением аналогичного вида, но с параметром $\beta = 1/M$ описывается вероятность возникновения m неисправностей $P_m = \beta(1-\beta)^{m-1}$. Тогда, применяя преобразования Лапласа, для вычисления сверток (3) и (6), получим

$$\varphi_n(t) = \frac{a_1(a_1 t)^{n-1}}{\Gamma(n)} e^{(-a_1 t)}, \tag{7}$$

$$\Gamma(n)=(n-1)!,$$

$$\varpi(t) = \alpha \cdot a_1 e^{(-a_1 t)} \sum_{n \in N} \frac{(a_1 t(1-\alpha))^{n-1}}{n!}. \tag{8}$$

В выражении (8) ряд с аргументами a_1, t, n представляет собой ряд неполной экспоненциальной функции. При достаточно больших N он с высокой точностью может быть аппроксимирован такой функцией, поэтому

$$\varpi(t) \approx \alpha \cdot a_1 e^{(-\alpha \cdot a_1 t)}, \tag{9}$$

$$W_1(t) = \frac{\alpha \cdot a_1 a_2}{a_2 - a_1}(e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}). \tag{10}$$

Из выражений (9) и (10) следует, что плотность вероятности $\omega(t)$ подчиняется экспоненциальному распределению с параметром $\alpha\, a_1$, а $W_1(t)$ – обобщенному распределению Эрланга 2-го порядка. Дальнейшие преобразования дают

$$P(t \le t_0) = \sqrt{\pi\beta} \int_0^{t_0} e^{(\frac{1}{2}(a_1+a_2)t)} \sum_{m \in M} (1-\beta^m) \times \tag{11}$$

$$\times \frac{(a \cdot a_1 a_2)^m}{\Gamma(m)} \left[\frac{t}{(a_1 - a_2)}\right]^{m-\frac{1}{2}} \times I_{m-\frac{1}{2}}\left(\frac{a_1 - a_2}{2} t\right),$$

где $I(.)$ – модифицированная цилиндрическая функция.

В ряде практически важных случаев выполняется условие $a_1 >> a_2$. Оно имеет место при высокопроизводительном технологическом оборудовании или (и) значительном времени устранения неисправности и тогда компонентой t_1 можно пренебречь. При таком условии

$$P(t \le t_0) = \beta \sum_{m \in M} (1-\beta)^m \cdot \frac{a_2(a_2 t)}{\Gamma(m)} e^{(-a_2 t)}. \tag{12}$$

Полагая, что $M>3$ с достаточной для практики точностью функциональный ряд в (12) аппроксимируется экспоненциальной функцией и тогда

$$P(t \le t_0) = 1 - e^{(-\frac{a_2}{M} t_0)}, \tag{13}$$

$$\bar{t} = \frac{1}{a_2}\left[1 - (e^{(-a_2 t_0)} \cdot (1 + a_2 t_0)\right]. \tag{14}$$

Построенные в результате решения (13) графики вероятности выполнения ремонта за заданное время $P(t \le t_0)$ приведены на рис. 1 и 2.

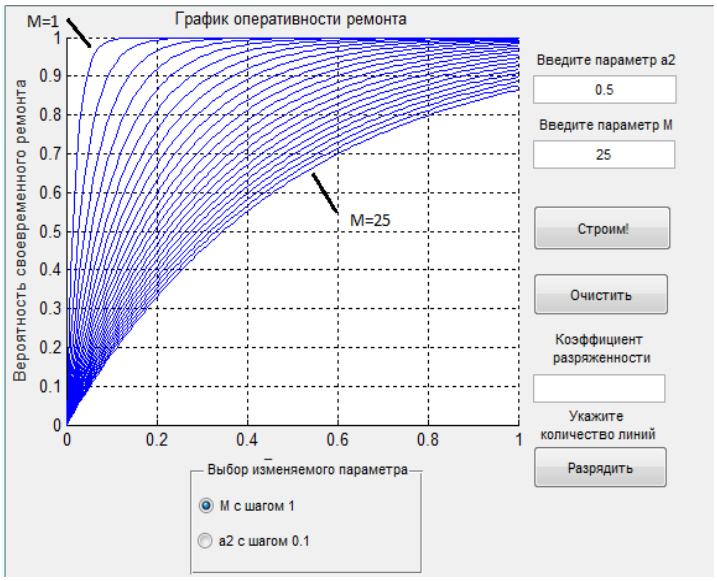

Рисунок 1 – Вероятность своевременного выполнения ремонта техники при изменении параметра M.

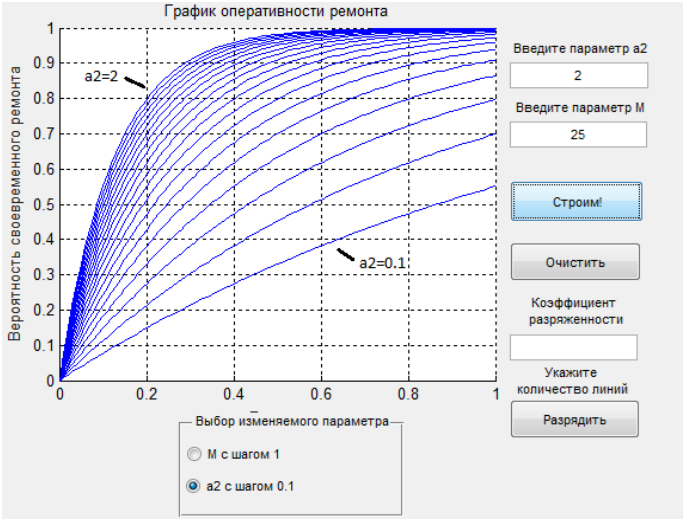

Рисунок 2 – Вероятность своевременного выполнения ремонта техники при изменении параметра a_2

Анализ рисунка 1 показывает, что с увеличением времени, отводимого на ремонт, вероятность своевременного ремонта монотонно возрастает, что очевидным образом следует из содержания моделируемого процесса. При этом графики $P(t \le t_0)$ отражают условия и динамику ремонта с учетом оснащения станции технического обслуживания подвижными и стационарными средствами контроля и ремонта и квалификацию инженерно-технического персонала. Так, с увеличением значений M (т.е. числа неисправностей ремонтируемого изделия) от 1 до 25 (рисунок 1) вероятность в определённый момент времени становится меньше (при t_0=0,4, M=1 $P(t \le t_0)$=1; при t_0=0,4, M=25 $P(t \le t_0)$=0,55). Наоборот, при M=25, в момент времени t_0=0,4 с увеличением a_2

(интенсивность устранения неисправностей) от 0,1 до 2 (рисунок 2) вероятность $P(t \le t_0)$ увеличивается более чем в 3 раз от 0,27 до 0,95.

Вывод. Таким образом, разработанная математическая модель вероятностно-временных характеристик оперативности ремонта АТСН, учитывает оснащенность станции технического обслуживания подвижными и стационарными средствами контроля и ремонта и квалификацию инженерно-технического персонала. Ее использование позволяет разрабатывать практические рекомендации по предъявлению требований к характеристикам диагностического оборудования станции технического обслуживания и инженерно-технического персонала.

Список источников

1. Аринин Е.Н., Коновалов С.И., Баженов Ю.В. Техническая эксплуатация автомобилей: учеб. пособ. 2-е изд. Ростов н/Д.: Феникс, 2007. 314 с.

2. Техническая эксплуатация автомобилей / Под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Транспорт, 1991. 413с.

3. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Основы диагностики технических устройств и сооружений. Москва: Издательсво МГТУ им. Баумана, 2015. 445 с.

4. Болотин В.В. Прогнозирование и нормирование ресурса машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 7. С. 3–10.

5. Спирина М.С., Спирин П.А. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Академия, 2-е издание. 2011. 352 с.

6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 9-е изд., стер. - М.: Издательский центр «Академия», 2003. - 576 с

7. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М., Сов. радио, 1977. 488 с. с ил.

References

1. Arinin E.N., Konovalov S.I., Bazhenov Yu.V. Technical operation of cars: textbook. help. 2nd ed. Rostov n/A: Phoenix, 2007. 314 p.

2. Technical operation of cars / Edited by E.S. Kuznetsov. M.: Transport, 1991. 413 p.

3. Bigus G.A., Daniev Yu.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. Fundamentals of diagnostics of technical devices and structures. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2015. 445 p.

4. Bolotin V.V. Forecasting and rationing of the resource of machines // Assembly in mechanical engineering, instrumentation. 2009. No. 7. pp. 3-10.

5. Spirina M.S., Spirin P.A. Probability theory and Mathematical statistics. M.: Academy, 2nd edition. 2011. 352 p.

6. Wentzel E.S. Probability theory. 9th ed., ster. - M. : Publishing center "Academy", 2003. - 576 p.

7. Tikhonov V.I., Mironov M.A. Markov processes. – M., Sov. radio, 1977. 488 p.

Информация об авторах

Д. Н. Смирнов - кандидат технических наук; С. А. Чернопятова - кандидат технических наук; А.И.Малютин – соискатель**;** С.Ю. Панов - доктор технических наук.

Information about the authors

D. Smirnov - Candidate of Technical Sciences; S. Chernopyatova - Candidate of Technical Sciences; A. Malyutin – applicant; S. Panov - Doctor of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: *all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 08.06.2023 Принята к публикации (Accepted): 28.06.2023