

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПОЖАРНОЙ ТЕХНИКИ

Предлагается эмпирически обоснованная математическая зависимость, связывающая наработку и износ пожарных автомобилей с интенсивностью потоков их поломок и восстановления.

Ключевые слова: пожарные автомобили, наработка на отказ, износ, надёжность, интенсивности потоков поломок и восстановления.

Yu. V. Prus, Le Than Bin, E. M. Alehin, V. M. Klimovcov

METHODOLOGY TO EVALUATE THE RELIABILITY INDICES AUTOMOTIVE FIRE EQUIPMENT

Empirically grounded mathematical dependence linking operating time and wear fire trucks with the intensity of flows their breakdowns and recovery are offered.

Key words: fire trucks, mean time to failure, wear, reliability, intensity of flows breakdowns and recovery.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 23 декабря 2013 г.

Организация и управление процессами эксплуатации, технического обслуживания, ремонта современной пожарной техники требует внедрения автоматизированных систем управления, основанных на применении математических моделей и методов, позволяющих вырабатывать обоснованные и эффективные организационные и управленческие решения [1, 2]. При моделировании эксплуатации автомобильной техники применяются, как правило, методы теории систем массового обслуживания [3], которые позволяют найти основные параметры, необходимые для оценки эффективности эксплуатации автопарка [4-6].

Однако необходимо учитывать, что одним из наиболее важных критериев эффективности эксплуатации пожарной техники становится степень готовности к выезду и выполнению задач по тушению пожаров. В [7] авторами построена общая Марковская модель функционирования автопарка пожарной техники отдельного подразделения, позволяющая рассматривать её возможные состояния, различающиеся между собой по степени готовности пожарной техники и описывающая динамику изменения готовности на основе рассмотрения прямых и обратных переходов между различными состояниями моделируемой системы. Основной вывод из предварительного анализа динамики изменения готовности реальных подразделений, проведенного методами имитационного моделирования на основе этой модели, заключается в невозможности описания её поведения в рамках теории систем массового обслуживания. Несмотря на то, что мо-

делируемая система является эргодической, при рассмотрении характера её поведения возникает необходимость учёта наблюдающихся в ней при изменении начального состояния достаточно длительных переходных процессов.

Для моделирования функционирования реальных подразделений с автопарком пожарной техники необходимо с достаточной точностью определить показатели интенсивности прямых и обратных переходов в соответствующих уравнениях Колмогорова. В описывающих поведение моделируемой системы уравнениях [7] прямые переходы связаны с возникновением неисправностей в процессе эксплуатации пожарных автомобилей (поломок), которые приводят к "выходу из строя". Обратные переходы обусловлены устранением неисправностей в процессе ремонта и технического обслуживания (восстановления) пожарных автомобилей и приводят к "возвращению в строй".

Прямые переходы связаны с возникновением неисправностей пожарных автомобилей в процессе эксплуатации. Для количественного описания переходов необходимо определить для каждого пожарного автомобиля интенсивность связанного с возникновением неисправностей потока событий, которая может зависеть от различных эксплуатационных факторов (типа автомобиля, возраста, пробега, дорожных и климатических условий и т.п.)

Прямые переходы между смежными состояниями обусловлены потоками событий, связанных с возникновением неисправностей отдельных автомобилей и количественно описываются интенсивностями потоков λ_i (поломок i -го ПА). Для каждого пожарного автомобиля интенсивность связанного с возникновением неисправностей потока событий λ_i представляет собой некоторую величину, которую можно определить на основе анализа статистических данных о поломках автомобиля.

При математическом моделировании [4,5] используется понятие "Параметр потока отказов" (Failure intensity), определяемый в [8] как отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки. Также используется технический параметр "наработка на отказ", характеризующий надёжность восстанавливаемого прибора, устройства или технической системы. Согласно [8] она определяется как отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Ключевым понятием является "наработка" (Operating time), под которым понимается продолжительность или объём работы, причем в зависимости от вида восстанавливаемого объекта она может быть представлена различным образом [8-10]. Допускается её представление как непрерывными величинами (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), и целочисленными (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

При математическом моделировании эксплуатации автотранспортных средств [2-6,11] наработка чаще всего оценивается в показателях пробега. Такой подход представляется оправданным в случае эксплуатации крупными автотранспортчиками, поскольку практически весь технический ресурс автотранспортных средств вырабатывается за достаточно короткое время.

Общая наработка автотранспортных средств напрямую связана с таким понятием, как износ, амортизация (*depreciation*). При оценке остаточной стоимости используются как показатели пробега, так и время эксплуатации автотранспортных средств [12]. При этом учитывается изменение качества автотранспортных средств не только в ходе эксплуатационного износа, но и вследствие иных деградационных процессов, связанных с накоплением повреждений при старении.

Отличительные особенности пожарной автомобильной техники в сравнении с использованием автотранспортных средств в других сферах деятельности проявляются в относительно большой длительности эксплуатации и малой интенсивности применения. Поэтому при моделировании различных эксплуатационных показателей, отражающих характеристики качества и надёжности, становится необходимым учёт временного фактора. На эксплуатационную надёжность пожарной автомобильной техники помимо временного фактора существенное влияние могут оказывать режим работы, дорожные и климатические условия, в которых она эксплуатируется, а также качество технического обслуживания и хранения.

В данном случае представляется целесообразным сделать следующее предположение: *обобщённая наработка, понимаемая как степень износа, является некоторой функцией состояния объекта, полностью определяющая все его эксплуатационные характеристики*. Обобщенную наработку D пожарной автомобильной техники следует представлять некоторым эмпирически обоснованным функционалом:

$$D = F(T, L, W, C, S, R), \quad (1)$$

который учитывает основные эксплуатационные факторы: срок эксплуатации автомобиля (T) и его пробег (L), с учётом влияния дополнительных факторов, обусловленных режимом эксплуатации в определённых дорожных (W) и климатических условиях (C), а также качеством обслуживания (S) и условиями хранения (R). Полный дифференциал в пространстве основных переменных T и L имеет вид:

$$dD = P(S, R)\delta T + Q(C, W)\delta L, \quad (2)$$

где $P(S, R)$ и $Q(C, W)$ представляют собой некоторые функции вышеуказанных дополнительных факторов.

Возникновение отказов (поломок) в ходе эксплуатации различных технических объектов, как правило, описывают U -образной функцией Вейбулла с различными параметрами. При моделировании отказов автомобильной техники можно использовать функцию отказов упрощенного вида, например, экспоненциального либо линейного.

Авторами предполагается, что общее количество поломок за всё время эксплуатации до достижения износа (обобщенной наработкой) величины D является некоторой монотонной интегральной функцией износа, имеющей экспоненциальный вид:

$$f = ke^{mD}. \quad (3)$$

Тогда интенсивность отказов λ автомобилей определяется как полная производная по времени от интегральной функции износа:

$$\lambda = \frac{df}{dt} = km \frac{dD}{dt} e^{mD} = km\dot{D}e^{mD} \quad (4)$$

При нахождении конкретного вида функции интенсивности износа \dot{D} будем считать, что при небольших сезонных колебаниях температур и влажности климатические условия эксплуатации слабо отражаются на надежности автомобиля, что подтверждается статистическими данными по отказам эксплуатируемых во Вьетнаме пожарных автомобилей. Дорожные условия эксплуатации пожарных автомобилей, обслуживающих выбранную территорию, примерно одинаковы и также не должны приводить к отличиям показателей их эксплуатационной надежности. Аналогичные выводы можно сделать при анализе влияния качества обслуживания и условий хранения. Таким образом, допустимо использовать приближение для функций $P(S, R)$ и $Q(C, W)$ в (2), принимая их значения как некоторые постоянные величины P и Q , и тогда из (4) получим:

$$\lambda = km \left(P + Q \frac{\partial L}{\partial t} \right) e^{mD}. \quad (5)$$

Поскольку интенсивность износа \dot{D} при эксплуатации автомобилей в основном обусловлена его пробегом, можно с хорошим приближением считать:

$$P \ll Q \frac{\partial L}{\partial t},$$

и принять:

$$\lambda \cong kmQ \frac{\partial L}{\partial t} e^{mD} = kmQ\dot{L}e^{mD}.$$

При эксплуатации автомобилей, имеющих близкие значения срока эксплуатации T и пробега L , различие их общего износа допустимо представить как:

$$\begin{aligned} \Delta D &= P\Delta T + Q\Delta L, \\ (\Delta D \ll D). \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (4) и проделав дополнительные приближения и преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \lambda &= kmQ\dot{L}e^{m(D_0+\Delta D)} \cong kmQ\dot{L}e^{mD_0} (1 + m\Delta D) = kmQ\dot{L}e^{mD_0} (1 + mP\Delta T + mQ\Delta L) = \\ &= kmQ\dot{L}e^{mD_0} (1 + mP\Delta T + mQ\Delta L) = kmQ\dot{L}e^{mD_0} (1 + mP(T - T_0) + mQ(L - L_0)) = \\ &= kmQ\dot{L}e^{mD_0} (mPT + mQL - mPT_0 + mQL_0 + 1). \end{aligned} \quad (7)$$

Как видно из (7), вполне возможно привести (5) к некоторой линейной относительно переменных T и L аддитивно-мультипликативной функции вида:

$$\lambda = \dot{L}(aT + bL + c). \quad (8)$$

Допустимость представления интенсивности отказов автомобилей аддитивно-мультипликативной функцией вида (8) подтверждается статистическими данными по отказам эксплуатируемых во Вьетнаме пожарных автомобилей.

В табл. 1 приведены данные по отказам и ремонтам автомобилей Зил-130, эксплуатируемых в пожарных подразделениях г. Ханой, с определением коэффициентов для (8). Из этих данных следует, что подобранная линейная функция достаточно точно описывает изменение интенсивности отказов однородной группы автомобилей одной марки, то есть со сравнительно небольшими отличиями в пробеге и сроке эксплуатации.

Таблица 1

№	Среднее кол-во поломок в месяц λ_i (1/мес.)	Среднее время ремонта τ_i (сут.)	Пробег L_i (тыс. км)	Срок эксплуатации T_i (год)	Средний пробег за последние 12 месяцев \dot{L}_i (тыс. км/мес.)	Среднее кол-во поломок на пробег $\lambda'_i = \frac{\lambda_i}{\dot{L}_i}$ (1/тыс. км)
1	0,33	0,5	13,25	16	0,083	3,98
2	0,67	0,75	35,80	17	0,08	8,38
3	0,83	1,63	88,93	19	0,075	11,07
4	0,83	1,5	82,37	19	0,073	11,37
5	1,17	1,6	93,34	23	0,065	18
6	1,17	1,7	112,35	23	0,062	18,87
7	1,33	1,75	127,35	24	0,06	22,17
8	1,33	1,8	128,38	24	0,058	22,93
9	1,5	2,0	130,77	25	0,056	26,79
10	1,5	2,08	138,53	25	0,05	30
11	1,5	2,14	142,15	26	0,048	31,25
12	1,5	2,44	148,36	27	0,045	33,33
13	1,5	2,5	152,12	27	0,043	34,88
Функция отказов $\lambda = \dot{L}(0,002 L + 2,622 T - 38,738)$						
Функция восстановления $\mu = 1/\tau = 1/(0,003 L + 0,013 T + 0,279)$						

Обратные переходы Марковской модели [7] связаны с устранением неисправностей в процессе ремонта и технического обслуживания. На производительность ремонтной бригады при устранении неисправностей конкретного автомобиля оказывают влияние все перечисленные выше эксплуатационные факторы, основными из которых также являются срок эксплуатации T и пробег L . Поэтому представляется вполне обоснованным предположение о представлении средней продолжительности ремонта линейной относительно переменных T и L функцией:

$$\tau = kT + nL + d . \quad (9)$$

Допустимость представления (9) также подтверждается статистическими данными табл. 1. Подобранные коэффициенты для линейной функции (9) позволяют достаточно точно описывать изменение средней продолжительности ремонта автомобилей однородной группы. Соответственно (9), интенсивность восстановления автомобилей задаётся обратной функцией вида:

$$\mu = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{kT + nL + d}. \quad (10)$$

В соответствии с описанным выше подходом, интенсивности поломок и восстановления напрямую связаны с общим износом. Поэтому для автомобиля определенной марки Y необходимо учитывать влияние всех описанных в (1) эксплуатационных факторов, то есть представлять их функциями общего вида:

$$\begin{aligned} \lambda_i &= f(Y_i, T_i, L_i, W_i, C_i, S_i, R_i) \\ \mu_i &= f(Y_i, T_i, L_i, W_i, C_i, S_i, R_i) \end{aligned} \quad (11)$$

При определении функций (11) для однородной группы автомобилей определенной марки Y , имеющих сходные условия эксплуатации и обслуживания, сравнительно небольшие отличия в пробеге и возрасте, допустимо применение приближений (8) и (10). Тогда на основе предварительного анализа статистических данных по отказам и ремонту однородной группы автомобилей определяются коэффициенты для функций интенсивности поломок (8) и интенсивности восстановления (10). Затем полученные коэффициенты могут быть применены для любого имеющего близкие с рассмотренной группой эксплуатационные характеристики автомобиля при оценке значений интенсивностей поломок и восстановления с учётом возраста (T) и пробега (L):

$$\begin{aligned} \lambda_i &= f(T_i, L_i) \\ \mu_i &= f(T_i, L_i) \end{aligned} \quad (12)$$

Представление интенсивностей прямых и обратных переходов в виде функций (12) позволяет в дальнейшем реализовать Марковскую модель [12] при построении системы компьютерного имитационного моделирования функционирования автопарка пожарной техники. При соответствующем развитии и статистическом наполнении такая система компьютерного имитационного моделирования может стать основой для автоматизированной системы поддержки принятия организационных и управленческих решений по совершенствованию материально-технического обеспечения подразделений пожарной охраны.

Литература

1. **Российская** автотранспортная энциклопедия. Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт автотранспортных средств. Т. 3 / под ред. Е. С. Кузнецова. М.: РООИП, 2000. 456 с.
2. **Масуев М.А.** Проектирование предприятий автомобильного транспорта. М.: Академия, 2007. 224 с.
3. **Зарубкин В.А.** Оптимизация системы технического обслуживания и ремонта автомобилей в АТП. М.: ЦБНТИ Минавтотранса РФ, 1976. 126 с.
4. **Барзилович Е.Ю., Кашианов В.А.** Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. М.: Советское радио, 1971. 272 с.
5. **Завадский Ю.В.** Решение задач автомобильного транспорта методами имитационного моделирования. М.: Транспорт, 1977. 72 с.
6. **Захаров Н.С.** Моделирование процессов изменения качества автомобилей. Тюмень: ТюмГНГУ, 1999. 127 с.
7. **Сатин А.П., Ле Тхань Бинь, Прус Ю.В.** Марковская модель функционирования автопарка пожарного подразделения // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. 2012. № 5. 12 с.
8. **ГОСТ 27.002-89.** Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
9. **ГОСТ 27.503-90.** Надёжность в технике. Система сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надёжности.
10. **РД 37.001.045-87** Автотранспортные средства. Показатели надёжности. Номенклатура, нормирование, контроль.
11. **Ревякин М.М.** Повышение надёжности грузовых автомобилей путём применения системы эксплуатационной самодиагностики // автореф. дисс. к.т.н., 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта. Орёл, 2012. 20 с.
12. **Андреанов Ю.В.** Классификация и идентификация транспортных средств в течение их жизненного цикла. М.: ОАО НИИАТ, 2013. 160 с.