

УДК 658.149.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ  
НАДЕЖНОСТИ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

<sup>1</sup>К.А. Кучув, <sup>2</sup>Э.Н. Бусарин, <sup>2</sup>В.П. Белокуров  
(Институт «ЮжДАГ» Дербент, ФГБОУ ВПО ВГЛТА)

Параметр надежности для лесного автотранспорта является одним из основных показателей качества и эффективности функционирования современных лесовозных автотранспортных средств (АТС), проявляющийся во времени и отражающий изменения, происходящие в АТС на протяжении всего срока их эксплуатации. Современные АТС являются сложными техническими системами, состоящими из множества подсистем, агрегатов и узлов, которые содержат тысячи деталей. Как основной вид наземного безрельсового транспорта лесовозный автотранспорт работает в самых различных дорожных, климатических и других условиях эксплуатации. Основные эксплуатационные свойства автотранспорта связаны с его движением. Они определяются параметрами и выходными характеристиками систем, агрегатов и узлов. Уровень этих параметров обеспечивается в процессе конструирования и производства, зависит при эксплуатации от технического состояния автотранспорта. При длительной эксплуатации техническое состояние лесовозного автотранспорта, как и любой машины, неизбежно ухудшается.

Агрегаты и большинство деталей лесовозных АТС являются ремонтируемыми объектами, их исправность и работоспособность в случае возникновения отказа или повреждения подлежат восстановлению. Закономерности переходов технического состояния деталей, агрегатов и систем АТС из исправного, работоспособного состояния в неисправное, неработоспособное состояние и, наконец, в предельное состояние и обратно характеризуют надёжностные свойства лесовозных АТС как сложных технических систем и их подсистем, агрегатов и узлов.

Для получения аналитических выражений показателей надёжности лесовозных АТС, будем предполагать, что АТС функционирует по следующей схеме: отказавшие элементы и подсистемы начинают немедленно восстанавливаться; отсутствуют ограничения на число восстановлений; отказ одной из элементов или подсистем привлечёт за собой отказ лесовозного АТС в целом. Возможные состояния АТС, функционирующего по предложенной выше схеме, могут быть

изображены в виде ориентированного графа состояний (рисунок 1): состояние  $X_0$  соответствует состоянию АТС, когда все подсистемы работоспособны, т.е. АТС находится в работоспособном состоянии в любой момент времени; состояние  $X_1$  соответствует состоянию АТС, когда первая подсистема (двигатель) неработоспособна, остальные подсистемы работоспособны; состояние  $X_2$  соответствует состоянию АТС, когда вторая подсистема (муфта сцепления) неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны; состояние  $X_3$  соответствует состоянию АТС, когда третья подсистема (коробка передач) неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны; состояние  $X_4$  соответствует состоянию АТС, когда четвёртая подсистема (трансмиссия) неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны; состояние  $X_5$  соответствует состоянию АТС, когда пятая подсистема (тормозная система) неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны.

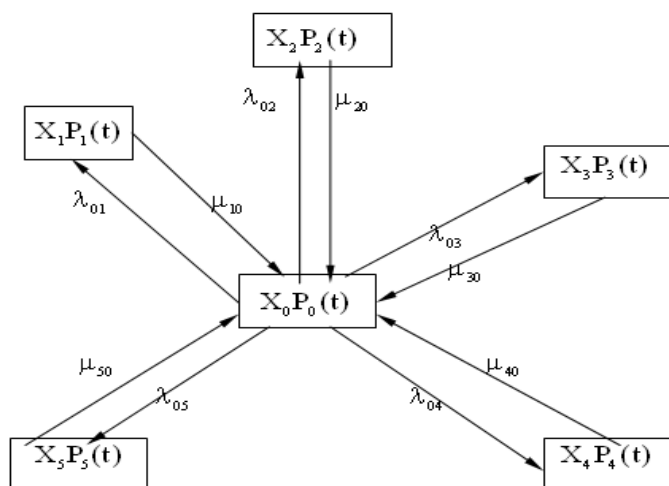


Рисунок 1 – Ориентированный граф возможных состояний лесовозных автотранспортных средств как восстанавливаемой системы

При этом считается, что вероятность  $P$  одновременного появления двух и более неработоспособных подсистем пренебрежимо мала. Символом  $\lambda_{0i}$ ,  $i = \overline{1, n}$  на рисунке 1 обозначена интенсивность отказов  $i$ -ой подсистемы; символом  $\mu_{0i}$ ,  $i = \overline{1, n}$  обозначена интенсивность восстановления  $i$ -ой подсистемы.

По графу состояний (рисунок 1) составлена система дифференциальных уравнений Колмогорова-Смирнова, которая имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_{01} \cdot P_0(t) - \mu_{10} \cdot P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{02} \cdot P_0(t) - \mu_{20} \cdot P_2(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{03} \cdot P_0(t) - \mu_{30} \cdot P_3(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{04} \cdot P_0(t) - \mu_{40} \cdot P_4(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{05} \cdot P_0(t) - \mu_{50} \cdot P_5(t)\end{aligned}\quad (1)$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = \mu_{10} \cdot P_1(t) + \mu_{20} \cdot P_2(t) + \mu_{30} \cdot P_3(t) + \mu_{40} \cdot P_4(t) + \mu_{50} \cdot P_5(t) - P_0(t) \cdot \sum_{i=1}^5 \lambda_{0i}.$$

Для выражений (1) следует условие

$$\sum_{i=0}^5 P_i(t) = 1. \quad (2)$$

Далее принимаем, что имеем дело с установившимся режимом эксплуатации лесовозного АТС. Тогда дифференциальные уравнения (1) можно записать в следующей системе:

$$\begin{aligned}\lambda_{01} \cdot P_0 &= \mu_{10} \cdot P_1 \\ \lambda_{02} \cdot P_0 &= \mu_{20} \cdot P_2 \\ \lambda_{03} \cdot P_0 &= \mu_{30} \cdot P_3 \\ \lambda_{04} \cdot P_0 &= \mu_{40} \cdot P_4 \\ \lambda_{05} \cdot P_0 &= \mu_{50} \cdot P_5\end{aligned}\quad (3)$$

$$P_0 \cdot \sum_{i=1}^5 \lambda_{0i} = \mu_{10} \cdot P_1 + \mu_{20} \cdot P_2 + \mu_{30} \cdot P_3 + \mu_{40} \cdot P_4 + \mu_{50} \cdot P_5$$

Решив полученную систему алгебраических уравнений (3) с учётом условия (2), получим следующее значение для вероятности нахождения лесовозного АТС в работоспособном состоянии в любой момент времени

$$P_0 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \cdot P_0 + \frac{\lambda_{02}}{\mu_{20}} \cdot P_0 + \frac{\lambda_{03}}{\mu_{30}} \cdot P_0 + \frac{\lambda_{04}}{\mu_{40}} \cdot P_0 + \frac{\lambda_{05}}{\mu_{50}} \cdot P_0 = 1 \quad (4)$$

или

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^5 \frac{\lambda_{0i}}{\mu_{i0}}}. \quad (5)$$

Вероятность нахождения лесовозного АТС в  $i$ -ом состоянии, когда  $i$ -ая подсистема неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны, согласно (3) определяется как

$$P_i = \frac{\lambda_{0i}}{\mu_{i0}} \cdot P_0. \quad (6)$$

Таким образом, зная значения интенсивностей отказа  $\lambda_{0i}$  и восстановления  $\mu_{i0}$  подсистем (основных агрегатов) лесовозного АТС можно определить вероятность нахождения АТС в том или ином состоянии по формуле (6).

Остановимся на определении функции готовности  $K_r(t)$  АТС как системы, состоящей из  $n$  подсистем. Известно [1, 2], что функция готовности системы характеризует вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии в любой момент времени:

$$K_r(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t), \quad (7)$$

где  $P_i(t)$  – вероятность нахождения системы в  $i$ -ом работоспособном состоянии в момент времени  $t$ .

Для установившегося режима эксплуатации лесовозного АТС вместо вероятностей  $P_i(t)$  имеем вероятность  $P_i = const$ . Тогда вместо (7) для коэффициента готовности  $K_r$ , будем иметь выражение [3]:

$$K_r = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (8)$$

Так как формулы (5) и (8) имеют одинаковый физический смысл, а именно они определяют вероятность нахождения лесовозного АТС в работоспособном состоянии, то имеет место равенство:

$$K_r = P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{0i}}{\mu_{i0}}}. \quad (9)$$

Для определения показателей надежности лесовозных АТС, характеризующих процесс восстановления, важное значение имеет установление связи между коэффициентом готовности подсистемы  $K_r$ , находящейся в  $i$ -ом состоянии после

проведения восстановительных мероприятий, и интенсивностью восстановления  $\mu_{i0}$  [4]. Из выражения (5) для каждого  $i$ -го состояния можем получить соответствующие выражения для  $K_{ri}$ :

$$K_{ri} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{0i}}{\mu_{i0}}} = \frac{\mu_{i0}}{\mu_{i0} + \lambda_{0i}} \quad (10)$$

Из зависимости (10) следует, что для лесовозного АТС, находящегося, например, в первом состоянии, когда первая подсистема (двигатель) неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны АТС можно перевести в работоспособное состояние с коэффициентом готовности  $K_{r1}$  путём проведения соответствующих восстановительных мероприятий с интенсивностью  $\mu_{10}$ , то есть

$$K_{r1} = \frac{\mu_{10}}{\mu_{10} + \lambda_{01}}.$$

Аналогичные выражения имеют место и для случаев, когда лесовозное АТС находится во втором, третьем и других состояниях.

Если необходимые (требуемые) коэффициенты готовности для лесовозного АТС, находящегося в том или ином неработоспособном состоянии заданы, и требуется определить интенсивность восстановительных мероприятий (в частности для обоснования необходимого состава ремонтно-восстановительных служб предприятий), то из выражения (10) следует

$$\mu_{i0} = \frac{\lambda_{0i} \cdot K_{ri}}{1 - K_{ri}}. \quad (11)$$

Подставив выражения для интенсивностей восстановления в зависимость (9) имеем формулу для коэффициента готовности лесовозного АТС в любой момент времени в целом как функцию от коэффициентов готовности отдельных подсистем.

$$K_z = P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{K_{zi}} - 1 \right)}. \quad (12)$$

Таким образом, если известны требуемые значения коэффициентов готовности для каждой подсистемы (основных агрегатов) АТС, либо они определены расчётным путём, то подставив эти значения в зависимость (12) получим соответствующее значение коэффициента готовности лесовозного автотранспортного средства в целом.

Достижение требуемых значений коэффициента готовности автотранспортных средств обеспечивается оперативной разработкой и внедрением комплекса мероприятий по обеспечению диагностирования, ремонта, восстановления и обслуживания элементов и подсистем лесовозных АТС. Этот комплекс мероприятий в свою очередь определяет значения интенсивностей восстановления  $\mu_{i0}$  отдельных элементов и подсистем.

Для оценки значений коэффициента готовности лесовозных АТС в целом, а также её отдельных подсистем (основных агрегатов) наряду со значениями интенсивностей восстановления  $\mu_{i0}$  необходимо также значения интенсивностей отказов  $\lambda_{0i}$ . Установление значений  $\lambda_{0i}$  связано с определением вероятностей безотказной работы отдельных элементов и подсистем до первого отказа  $P_{Li}(t)$ , которая для экспоненциального закона распределения безотказной работы АТС представляется в виде:

$$P_{Li} = \exp(-\lambda_{0i} \cdot t). \quad (13)$$

Следует отметить, что вместо наработки на отказ по времени  $T_1(P_{T1}(t))$  в исследованиях используется наработка на отказ по расстоянию  $L_1(P_{L1}(t))$

Когда рассматривается вероятность безотказной работы такой сложной системы, как лесовозное АТС, то необходимо обязательно фиксировать время безотказной работы лесовозного АТС. Поэтому здесь более уместно говорить о  $\beta$ -квантильном времени безотказной работы лесовозного АТС  $T_\beta$ , определяемом как:

$$L_\beta = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \ln P_{L1}(l_\beta) = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \ln \beta \quad (14)$$

или применительно к отдельным элементам и подсистемам

$$L_\beta = -\frac{1}{\lambda_{0i}} \cdot \ln P_{Li}(l_\beta) = -\frac{1}{\lambda_{0i}} \cdot \ln \beta_i, \quad (15)$$

где  $\beta$  и  $\beta_i$  –  $\beta$ -квантильные вероятности безотказной работы до первого отказа АТС в целом и подсистем соответственно.

Из выражения (15) получено выражение для интенсивности отказов  $i$ -подсистемы в зависимости от  $\beta$ -квантильного расстояния и  $\beta$ -квантильной вероятности безотказной работы  $i$ -ой подсистемы до первого отказа.

$$\lambda_{0i} = -\frac{1}{L_{\beta i}} \ln \beta. \quad (16)$$

Зная  $\beta$ -квантильные вероятности подсистем по теореме умножения вероятностей получено следующее выражение для безотказной работы лесовозного АТС в целом

$$P_{L1}(l_{\beta}) = \prod_{i=1}^n P_{L1i}(l_{\beta i}) = \prod_{i=1}^n \beta_i = \exp\left(-\sum_{i=1}^n L_{\beta i} \cdot \lambda_{0i}\right). \quad (17)$$

Представляется целесообразным в дальнейшем для удобства считать  $L_{\beta i}$  одинаковыми для всех подсистем, т.е.  $L_{\beta 1} = L_{\beta 2} = \dots = L_{\beta i} = L_{\beta}$ . Тогда выражение (17) будет представлена в виде

$$P_{L1}(l_{\beta}) = \exp\left(-L_{\beta} \sum_{i=1}^n \lambda_{0i}\right). \quad (18)$$

Выражения для обобщённого показателя надёжности лесовозных АТС и его составляющих позволяют оценить значения обобщённого показателя надёжности в функции частных показателей надёжности. Для этого рассмотрена структура лесовозного автотранспорта, состоящая из пяти основных агрегатов, причём, если один из агрегатов вышел из строя (неработоспособен), то автотранспорт находится в неработоспособном состоянии. Для выполнения расчётных оценок надёжности лесовозного АТС, например, марки КамАЗ, могут быть приняты следующие исходные данные:

1 Коэффициент готовности автомобиля в целом принимает значения:  
 $K_r = \{0,3; 0,5; 0,7; 0,9\}$ .

2 Вероятность безотказной работы АТС до первого отказа равна 0,90, т.е.  
 $P_{L1} = \beta = 0,90$ .

3  $\beta$ -квантильное расстояние безотказной работы АТС принимает значения:  $L_{\beta} = \{20 \cdot 10^3 \text{ км}; 40 \cdot 10^3 \text{ км}; 100 \cdot 10^3 \text{ км}; 200 \cdot 10^3 \text{ км}\}$ .

4  $\beta$ -квантильная длительность по расстоянию эксплуатации составляет  $300 \cdot 10^3 \text{ км}$ .

5 Исходные данные, полученные по материалам статистических исследований составляют: для двигателя  $L_{\beta_{дв.}} = 22 \cdot 10^3 \text{ км}$ ; для муфты сцепления  $L_{\beta_{м.с.}} = 29 \cdot 10^3 \text{ км}$ ; для коробки передач  $L_{\beta_{к.п.}} = 40 \cdot 10^3$ ; для карданной передачи  $L_{\beta_{кр.п.}} = 40 \cdot 10^3$ ; для тормозной системы  $L_{\beta_{т.с.}} = 30 \cdot 10^3 \text{ км}$ .

При этом можно принять, что коэффициенты готовности для основных агрегатов АТС равны 0,90, т.е.  $K_{Г_{дв.}} = K_{Г_{м.с.}} = K_{Г_{к.п.}} = K_{Г_{кр.п.}} = K_{Г_{т.с.}} = 0,9$ .

Анализ результатов расчетов показывает, что:

1 Значения обобщённого показателя надёжности существенным образом зависят от  $\beta$ -квантильной наработки на отказ и коэффициента готовности лесовозного автотранспорта.

2. При относительно больших значениях длительности по расстоянию наработки на отказ влияние коэффициента готовности на обобщённый показатель надёжности уменьшается. Так, например, для  $L_{\beta} = 20 \cdot 10^3 \text{ км}$  при  $K_{Г} = 0,5$  обобщённый показатель надёжности равен  $130 \cdot 10^3 \text{ км}$ ; а при  $K_{Г} = 0,7$   $A = 180 \cdot 10^3 \text{ км}$ , т.е. возрастает на 40%, то при  $L_{\beta} = 100 \cdot 10^3 \text{ км}$  обобщённый показатель надёжности соответственно будет равен  $A = 180 \cdot 10^3 \text{ км}$  и  $A = 220 \cdot 10^3 \text{ км}$ , т.е. возрастает на 33 %.

Для проведение мероприятий по обеспечению надёжности лесовозных АТС целесообразно в первую очередь применить такие мероприятия, которые обеспечивали бы повышение безотказности. Это связано с тем обстоятельством, что эффект от мероприятий по повышению надёжности в самой системе значительно выше, чем от мероприятий по восстановлению отказов системы.

Полученные результаты имеют важное практическое значение при проектировании комплексов обеспечения надёжности лесовозных автотранспортных средств. Они могут стать научно-методической базой для разработки и изготовления перспективной автотранспортной продукции как для лесной промышленности, так и для других отраслей.



Библиографический список

1 Дружинин, Г. В. Надежность автоматизированных систем / Г. В. Дружинин // М. : Энергия, 1987. – 336 с.

2 Пронников, А. С. Надежность машин / А.С. Пронников // М. : Машиностроение, 1978. – 234 с.

3 Кучув, К. А. Системные особенности решения проблемы оценки эффективности комплексов обеспечения надёжности автотранспортных средств / К. А. Кучув, Г. С. Гамидов, Н. К. Санаев // Проблемы управления качеством в машиностроении (ВНПК-1). Сб. статей Всероссийской научно-практической конференции / Махачкала, 2007.– С. 207-209.

4 Посметьев, В. И. Методика оценки эффективности автомобильного парка по показателям надёжности его функционирования / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, А. В. Макаренко // Мир транспорта и технологических машин, – ОрелГТУ, 2012. № 2 – С. 3-10.