



УДК 658.149.3

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Невзоров А. В., к.т.н.,

Лисовой И. А., к.т.н.,

Дидур В. В., к.т.н.

Уманский национальный университет садоводства

Тел. +380683511797

Аннотация – В статье рассмотрен ряд подходов к оценке показателей надежности автотранспортной техники, используемой в сельском хозяйстве средств. Их использование позволяет рационально распределять ресурсы на обеспечение надежности в период эксплуатации автотранспорта при выполнении сельскохозяйственных работ.

Ключевые слова: автотранспортная техника, надежность, эксплуатационный процесс, время эксплуатации, вероятность

Постановка проблемы и анализ последних исследований. Показатели надежности техники в сельском хозяйстве являются одним из основных факторов, влияющих на качество и эффективность функционирования современных агропромышленных предприятий [1, 2, 3]. Современная сельскохозяйственная техника и, в частности, автомобильные средства являются сложными техническими системами, состоящими из множества подсистем, агрегатов и узлов, которые содержат тысячи деталей. Как основной вид наземного безрельсового транспорта автомобильная техника 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 автомобильной техники, как и любой другой сельскохозяйственной машины, неизбежно ухудшается.

Агрегаты и большинство деталей автомобилей являются ремон-



тируемыми объектами, их исправность и работоспособность в случае возникновения отказа или повреждения подлежат восстановлению [4, 5]. Закономерности переходов технического состояния деталей, агрегатов и систем из исправного, работоспособного состояния в неисправное, неработоспособное и, наконец, в предельное состояние и (если такое возможно) обратно характеризуют свойства надежности автомобилей, как сложных технических систем и их подсистем, агрегатов и узлов [6].

Цель исследований. Целью исследования, результаты которого положены в основу данной статьи, есть обоснование целесообразности использования при анализе и прогнозировании показателей безотказности сельскохозяйственной техники предлагаемых математических моделей.

Основная часть. Для получения аналитических выражений показателей надёжности автомобильной техники, используемой в сельском хозяйстве, будем предполагать, что ее эксплуатация происходит по следующей схеме: отказавшие элементы и подсистемы начинают немедленно восстанавливаться; отсутствуют ограничения на число восстановлений; отказ одной из подсистем привлечёт за собой отказ машины в целом [6]. Возможные состояния автомобильной техники, функционирующей по такой схеме, могут быть изображены в виде обобщенного графа состояний (рис 1):

- состояние X_0 соответствует состоянию машины, когда все подсистемы работоспособны, т.е. она находится в работоспособном состоянии в любой момент времени;

- состояние X_1 соответствует состоянию машины, когда первая подсистема (двигатель) неработоспособна, остальные подсистемы работоспособны;

- состояние X_2 соответствует состоянию, когда вторая подсистема (муфта сцепления) неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны;

- состояние X_3 соответствует состоянию, когда третья подсистема (коробка передач) неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны;

- состояние X_4 соответствует состоянию, когда четвёртая подсистема (трансмиссия) неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны;

- состояние X_5 соответствует состоянию, когда пятая подсистема (тормозная система) неработоспособна, а остальные подсистемы работоспособны.

При этом считается, что вероятность P одновременного появления двух и более неработоспособных подсистем пренебрежимо мала. Символом λ_{0i} , $i = \overline{1, n}$ на рисунке 1 обозначена интенсивность отказов

i -й підсистеми; символом μ_{i0} , $i = \overline{1, n}$ – інтенсивність її відновлення.

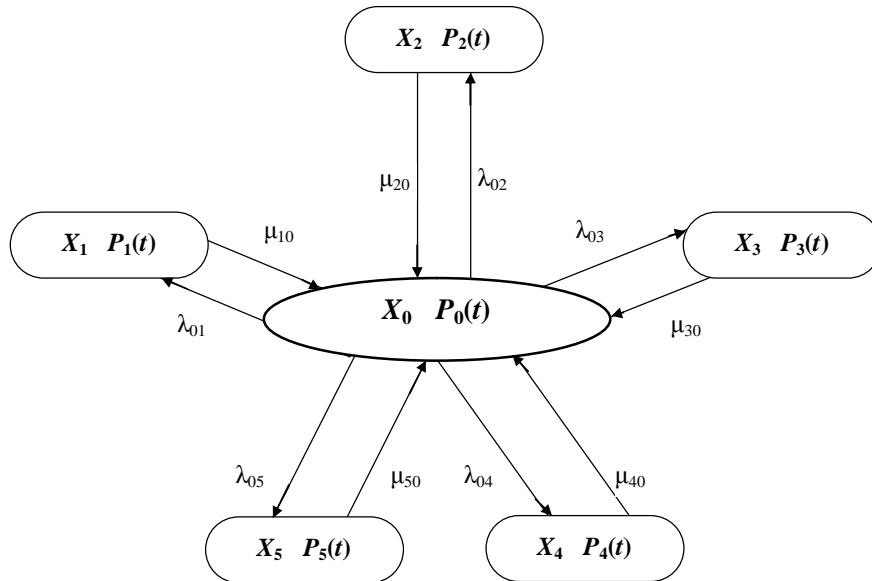


Рис. 1. Орієнтований граф можливих станів лісовозних автотранспортних засобів як відновлюваної системи

По графу станів складена система диференціальних рівнянь Колмогорова-Смирнова, яка має вигляд:

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

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

Для виражень (1) слідєть умовиє

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

Допустим, що експлуатація машини техніки здійснюється в нормальний період, то єсть інтенсивності відказів і відновлень систем, вузлів і агрегатів постійні во времени, а показателі безотказності і ремонтпригодності підчинені експоненціальному закону. Тоді диференціальні рівняння (1) можна записати в виді:



$$\begin{aligned}\lambda_{01} \cdot P_0 &= \mu_{10} \cdot P_1; \\ \lambda_{02} \cdot P_0 &= \mu_{20} \cdot P_2; \\ \lambda_{03} \cdot P_0 &= \mu_{30} \cdot P_3; \\ \lambda_{04} \cdot P_0 &= \mu_{40} \cdot P_4; \\ \lambda_{05} \cdot P_0 &= \mu_{50} \cdot P_5; \\ P_0 \cdot \sum_{i=1}^5 \lambda_{0i} &= \sum_{i=1}^5 \mu_{i0} \cdot P_i\end{aligned}\quad (3)$$

Решив полученную систему алгебраических уравнений (3) с учётом условия (2), получим следующее выражение для вероятности того, что автомобильная техника находится в работоспособном состоянии в произвольный момент времени:

$$P_0 \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^5 \frac{\lambda_{0i}}{\mu_{i0}} \right) = 1. \quad (4)$$

или

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

Вероятность нахождения машины в i -м состоянии, когда i -я 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 λ_{0i} и восстановления μ_{i0} подсистем (основных агрегатов) сельскохозяйственной автомобильной техники, можно определить вероятность ее нахождения в том или ином состоянии, используя (6). Рассчитаем коэффициент готовности $K_r(t)$ автомобиля как системы, состоящей из n подсистем. Известно [7, 8], что значение этого коэффициента для любой системы характеризует вероятность ее нахождения в работоспособном состоянии в произвольный момент времени:

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

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

Для режима нормальной эксплуатации машины вместо вероятностей $P_i(t)$ имеем вероятность $P_i = const$. Тогда вместо (7) для коэффициента готовности $K_r(t)$ получим выражение [9]:

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



Поскольку (5) и (8) имеют одинаковый физический смысл, а именно: они определяют вероятность нахождения машины 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 сельскохозяйственной техники, характеризующих процесс восстановления, важное значение имеет установление связи между коэффициентом готовности подсистемы $K_{ri}(t)$, находящейся в i -м состоянии после проведения восстановительных мероприятий, и интенсивностью восстановления μ_{i0} . Из (5) для каждого i -го состояния можем получить соответствующие выражения для $K_{ri}(t)$:

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

Из (10) следует, что для машины, находящейся, например, в первом состоянии (когда первая-двигатель, неработоспособен, а остальные подсистемы работоспособны), ее можно перевести в работоспособное состояние с коэффициентом готовности K_{r1} путём проведения соответствующих восстановительных мероприятий с интенсивностью μ_{10} , то есть

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

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

Если необходимые (требуемые) коэффициенты готовности для сельскохозяйственной машины, находящейся в том или ином неработоспособном состоянии заданы, и требуется определить интенсивности восстановлений (в частности для обоснования необходимого состава ремонтно-восстановительных служб), то из (10) следует

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

Подставив выражения для интенсивностей восстановления в зависимость (9), получим формулу для коэффициента готовности машины в целом как функцию от коэффициентов готовности отдельных подсистем:



$$K_r = P_0 = \left[1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{K_{ri}} - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (12)$$

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 машины в целом.

Достижение требуемых значений коэффициента готовности автотранспортных средств обеспечивается оперативной разработкой и внедрением комплекса мероприятий по обеспечению диагностирования, ремонта, восстановления и обслуживания их элементов и подсистем. Этот комплекс мероприятий определяет значения интенсивностей восстановления μ_{i0} отдельных элементов и подсистем.

Для оценки значений коэффициента готовности сельскохозяйственной техники в целом, а также её отдельных подсистем (основных агрегатов) наряду со значениями интенсивностей восстановления μ_{i0} необходимо также владение информацией о значениях интенсивностей отказов λ_{0i} .

Следует отметить, что вместо наработки на отказ по времени $T_1(P_{T1}(t))$ в исследованиях широко используется наработка на отказ по пробегу $L_1(P_{L1}(l))$. Установление значений λ_{0i} связано с определением вероятностей безотказной работы отдельных элементов и подсистем до первого отказа $P_{L1}(l)$, которая для экспоненциального закона распределения записывается как

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

Когда рассматривается вероятность безотказной работы такой сложной системы, как сельскохозяйственная техника, то необходимо обязательно фиксировать время ее безотказной работы в процессе эксплуатации. Поэтому здесь более уместно говорить о β -квантильном времени безотказной работы машины, 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

$$L_{\beta i} = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \ln P_{L1i}(l_{\beta}) = -\frac{1}{\lambda_{0i}} \cdot \ln \beta_i, \quad (15)$$

где β и β_i – β -квантильные вероятности безотказной работы до первого отказа машины в целом ее и подсистем соответственно.



Из (15) получено выражение для интенсивности отказов i -й подсистемы в зависимости от β -квантильного расстояния и β -квантильной вероятности безотказной работы i -й подсистемы до первого отказа:

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

Зная β -квантильные вероятности подсистем, по теореме умножения вероятностей получено выражение для безотказной работы машины в целом:

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

Целесообразно в дальнейшем для удобства считать $L_{\beta i}$ одинаковыми для всех подсистем. Тогда выражение (17) будет представлено в виде

$$P_{L1}(l_{\beta}) = \prod_{i=1}^n P_{L1i}(l_{\beta i}) = \prod_{i=1}^n \beta_i = \exp\left(-\sum_{i=1}^n L_{\beta i} \cdot \lambda_{0i}\right). \quad (18)$$

Выражения для обобщённого показателя надёжности сельскохозяйственной техники и ее составляющих позволяют оценить значения обобщённого показателя надёжности в функции частных показателей надёжности. Для этого рассмотрена структура машины, состоящая из пяти основных агрегатов, причём, если один из агрегатов вышел из строя (неработоспособен), то автотранспорт находится в неработоспособном состоянии [6]. Для выполнения расчетных оценок надёжности, например, марки КамАЗ, могут быть приняты следующие исходные данные:

1. Коэффициент готовности автомобиля в целом принимает значения: $K_T = \{0,3; 0,5; 0,7; 0,9\}$.
2. Вероятность безотказной работы автотехники до первого отказа равна 0,90, т.е. $P_{L1} = \beta = 0,90$.
3. β -квантильное расстояние безотказной работы автотехники 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. β -квантильный пробег автомобиля составляет $300 \cdot 10^3 \text{ км}$.
5. Исходные данные, полученные по материалам статистических исследований составляют: для двигателя $22 \cdot 10^3 \text{ км}$; для муфты сцепления $29 \cdot 10^3 \text{ км}$; для коробки передач $40 \cdot 10^3 \text{ км}$; для карданной передачи $40 \cdot 10^3 \text{ км}$; для тормозной системы $30 \cdot 10^3 \text{ км}$.

При этом можно принять, что коэффициенты готовности для основных агрегатов равны 0,90.

Выводы. Анализ результатов расчетов показывает, что:

1. Значения обобщённого показателя надёжности существенным образом зависят от β -квантильной наработки на отказ и коэффициента



готовности сельскохозяйственной автотехники.

2. При относительно больших значениях пробега влияние коэффициента готовности на обобщенный показатель надежности уменьшается. Так, например, для $L_{\beta}=20 \cdot 10^3$ км при $K_{Г}=0,5$ обобщенный показатель надежности равен $130 \cdot 10^3$ км, а при $K_{Г}=0,7$ – $180 \cdot 10^3$ км, т.е. возрастает на 40%, то при $L_{\beta}=100 \cdot 10^3$ км обобщенный показатель надежности соответственно будет равен $180 \cdot 10^3$ км и $220 \cdot 10^3$ км, т.е. возрастает на 33 %.

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

Полученные результаты имеют важное практическое значение при проектировании комплексов обеспечения надежности сельскохозяйственной автомобильной техники. Они могут стать научно-методической базой для разработки и изготовления перспективной автотранспортной продукции, как для сельского хозяйства, так и для других отраслей экономики.

Литература

1. *Войтюк В.Д.* Обоснование вида закона распределения показателей безотказности сельскохозяйственной техники // *В.Д. Войтюк, В.В. Дидур, А.В. Невзоров* / Вестник Украинского отделения международной академии аграрного образования – Вып. 2. – Мелитополь: Копицентр «Документ-сервис», 2014. – с. 149 – 157.
2. *Войтік А.В.* Методика визначення оптимальної надійнісної структури сільськогосподарської техніки // *А.В. Войтік, А.В. Невзоров, В.В. Дідур* / Вісник Українського відділення міжнародної академії аграрної освіти. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. – с. 55-61.
3. *Невзоров А.В.* Методика забезпечення експлуатаційної надійності сільськогосподарських машин // *А.В. Невзоров, Ю.О. Ковальчук, Т.О. Кутковецька* / Вісник Українського відділення міжнародної академії аграрної освіти. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. – с. 61-66.
4. *Невзоров А.В.* Експлуатаційні методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин / *А.В. Невзоров* / Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні питання сучасної аграрної науки», 19-20 листопада 2014 р. – К: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2014. с. 150 – 151.
5. *Думенко К.М.* Дослідження ударної міцності монометалевих і зміцнених двушарових лез прорізаючого робочого органу при аварійних пошкодженнях [Електронний ресурс] / *К.М. Думенко, І.С. Павлюченко, І.О. Лісовий* // Збірник тез доповідей II Міжнародної



- науково-технічної конференції «Крамаровські читання» (17-18 лютого 2015 року) / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К., 2015. – с. 83-86. – Режим доступу: <http://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/1929>
6. *Бойко А.І.* Функціонування сошника прямого посіву як відкритої технічної системи. / *А.І. Бойко, І.О. Лісовий, В.В. Тасенко* // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків, 2008. – Вип. 75; т. 1. – с. 256–258.
 7. *Дружинин Г.В.* Надежность автоматизированных систем / *Г.В. Дружинин* // М.: Энергия, 1987. - 336 с.
 8. *Пронников А.С.* Надежность машин / *А.С. Пронников* // М.: Машиностроение, 1978. - 234 с.
 9. *Кучув К. А.* Системные особенности решения проблемы оценки эффективности комплексов обеспечения надёжности авто транспортных 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.

СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ АВТОТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНІКИ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

А.В. Невзоров, І.О. Лісовий, В.В. Дідур

Анотація - У статті розглянуто ряд підходів до оцінки показників надійності автотранспортної техніки, що використовуються в сільському господарстві. Їх використання дозволяє раціонально розподіляти ресурси на забезпечення надійності в період експлуатації автотранспорту при виконанні сільськогосподарських робіт.

STATISTICAL ASSESSMENT OF RELIABILITY INDICATORS OF AUTO VEHICLES IN AGRICULTURE

A. Nevzorov, I. Lisovoy, V. Didur

Summary

The article discloses a range of approaches to the assessment indicators of vehicle reliability used in agricultural sector. Their application allows rational distributing resources for reliability support during exploitation of transport while carrying out agricultural work.