

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

### ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.3.004

В.А. Ушанов

#### К ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН

V.A. Ushanov

#### TO THE FORMALIZATION OF THE PROCESSES OF AGING AND RESTORATION OF CARS

**Ушанов В.А.** – д-р техн. наук, проф. каф. механизации и технического сервиса в АПК Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: info@kgau.ru

**Ushanov V.A.** – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Mechanization and Technical Service in AIC, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: info@kgau.ru

*В терминах, максимально приближенных к математической теории надежности, описана природа потери и восстановления работоспособности машин, рассматриваемых как вероятностная система стареющих элементов с неполным восстановлением. Аналитические исследования показали, что поток заявок для системы технического обслуживания и ремонта (ТОР) машин, представленный таким образом, описывается композицией законов распределения, решение которой приводит к аналитически неразрешимым многомерным интегралам. Следовательно, традиционные экономико-математические модели, в которых в качестве аналога объекта исследования используются аналитические выражения, не могут быть использованы при решении задач по дальнейшему совершенствованию системы сопротивления машин старению на корректных научных основаниях. Показано, что в процессе восстановления работоспособности машин операциями ремонта и замены происходит постоянное перераспределение ресурсов их составных частей, в результате каждая индивидуальная машина характеризуется неопределенностью технического состояния во времени. В связи с этим возникает глубокое противоречие между действующей регламентной системой обслуживания, основанной на использовании в качестве нормативов наперед заданную периодичность, и фактическим техническим состоянием машины в момент контроля. Преодоление этого противоречия возможно, на наш взгляд, путем*

*обоснования и использования принципиально новых по содержанию нормативов, управляющих содержанием ремонтно-обслуживающих работ (РОР). Установлена важнейшая роль превентивных ремонтных операций в условиях высоких рисков потерь продукции. Принятая интерпретация описываемых процессов открывает возможность разработки эффективных прикладных методов по обоснованию ресурсосберегающих технологий, используемых в системе технического сервиса машин.*

**Ключевые слова:** старение машин, работоспособность, технический отказ, профилактика, композиция законов распределения.

*In terms as close as possible to mathematical theory of reliability, the nature of the loss and restoration of cars is described, considered as probabilistic system aging elements with incomplete recovery. Analytical researches showed that the flow of demands for the system of maintenance and repair (SMR) of the cars presented thus is described by the composition of laws of distribution which decision leads to analytically unsoluble multidimensional integrals. Consequently, traditional economic and mathematical models in which the analogue of the object of research used analytical expressions can't be used in the solution of tasks on further improvement of the system resistance machines aging on correct scientific grounds. It is shown that in the course of maintenance of cars continuous redistribution of resources of their components happens operations of repair and replacement, as a result each indi-*

vidual car is characterized by uncertainty of technical condition in time. It is shown that in the process of restoration of cars operations repair and replacement is constant reallocation of resources to their constituent parts, as a result, each individual vehicle is characterized by the uncertainty of technical condition in time. In this regard, there is a deep contradiction between the current regulatory system of maintenance based on the use of the quality standards prescribed frequency, and the actual technical condition of the car at the time of control. Overcoming this contradiction is possible by the justification and use of essentially new standards on the contents operating the content of the repair serving works (RSW). The essential role of preventive maintenance operations in terms of the high risks of production losses was established. Accepted interpretation of described process opens up the possibility of developing effective practical methods to justification of resource-saving technologies used in the system of technical service of cars.

**Keywords:** machines' aging, efficiency, technical failure, prevention, composition of distribution laws.

**Введение.** Дальнейшее совершенствование системы технического сервиса как действенного инструмента сопротивления машин старению невозможно, по нашему мнению, без адекватного описания корневых проблем, связанных с последствиями отказов, идентифицируемых по различным критериям. Стремление к более точному описанию источника заявок на обслуживание привело к необходимости представления машины в процессе формализации как вероятностной системы стареющих элементов с разной степенью восстановления их работоспособности при ремонте.

**Цель исследования:** подготовить научную основу для разработки прикладных методик исследования и совершенствования нормативной базы системы ТОР машин.

**Задача использования:** формализовать процессы старения и восстановления работоспособности машин, поскольку математическое описание принципиальных особенностей открывает широкие возможности эффективного использования прикладных методов исследования.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Описывать процессы старения машин можно несколькими способами. Например, в терминах теории надежности, когда рассматриваются особенности нарастания интенсивности отказов и восстановления; можно путем анализа снижения экономической эффективности использования машин или оценки изменения рыночной стоимости подержанных машин (фактор морального износа). Неправильно считать, что эти способы независимы друг от друга или,

более того, находятся в противоречии между собой. Напротив, названные способы связаны общей исходной причиной. Так, рост затрат можно считать следствием увеличения числа отказов в стареющей машине. Но можно и рост числа отказов считать следствием недостаточности расходов на хранение, техническое обслуживание и профилактику машин. На наш взгляд, правильнее считать, что все упомянутые способы правомерно одновременно использовать для описания процесса и последствий старения машин, но в разных ипостасях, т. е. в зависимости от сущности содержания отдельных составляющих взаимосвязанного процесса и поставленной цели исследования. Важно на каждом этапе акцентировать внимание на резервах обеспечения стойкости машин к старению.

Опасностью отказа (иногда – интенсивностью отказов) –  $\lambda(T)$  называют условную вероятность отказа машины или ее элемента на малом интервале наработки, примыкающем к моменту  $t = T$ , при условии, что до этого момента изделие работало безотказно:

$$\lambda(T) = \frac{f(T)}{1 - F(T)}, \quad (1)$$

где  $F(T)$  и  $f(T)$  – функция и плотность распределения наработки до отказа соответственно.

У стареющих изделий, к которым относятся машины, используемые в АПК, опасность отказа по мере наработки возрастает. Именно рост опасности отказа – наиболее существенный признак старения, итогом которого является технический отказ.

Но не все изделия стареют и теряют работоспособность именно таким образом. Для некоторых из них  $\lambda(T) = \lambda = \text{const}$  и не зависит от наработки или практически не зависит, например, вероятность (риск) проколоть шину колеса. Такие отказы еще относят к внезапным. Время (пробег) до такого события имеет экспоненциальное распределение с плотностью:

$$f(T) = \lambda \exp(-\lambda T). \quad (2)$$

Однако преобладающее большинство машин и их механических составных частей относится к стареющим изделиям, и для них характерен постепенный рост  $\lambda(T)$ .

Естественной причиной роста опасности отказа является износ.

Термин «старение» имеет фундаментальное значение и исходит своими корнями из вывода второго закона термодинамики о росте энтропии (на-

растание необратимых процессов) в замкнутой системе.

Характерной особенностью машин является то обстоятельство, что они представляют собой систему элементов, каждый из которых обладает индивидуальной надежностью, описывается соответствующим законом распределения требований на обслуживание с *индивидуальными параметрами*.

Момент обслуживания определяется либо предельным состоянием по техническим причинам (реальный технический отказ), либо по технико-экономическим показателям (предупредительный ремонт отдельного элемента, попутный их ремонт или замена при полнокомплектном ремонте и групповой профилактике). В процессе такого обслуживания машины операциями ремонта и замены происходит постоянное перераспределение ресурсов составных частей у каждой конкретной машины. В любой момент времени машина характеризуется неопределенностью технического состояния. Задача состоит в том, чтобы в момент обслуживания машины сообщить ей соответствующий её фактическому техническому состоянию комплекс восстановительных работ. Здесь ключевое слово – «соответствующий».

Содержание комплекса ремонтно-обслуживающих работ обосновывается в зависимости от количественной оценки технического состояния машины, уровня развития технического сервиса и производственных условий. Такое обоснование является задачей дальнейших прикладных исследований.

Способов противодействия старению уже созданных элементов эксплуатируемых машин, строго говоря, не существует, если отвлечься от процессов их хранения. Однако, если машину рассматривать как систему элементов, эффективность ее работы зависит не только от имманентных свойств отдельных элементов, заложенных на этапе конструирования и изготовления, но и от дисциплины их обслуживания и ремонта (чаще используют термины стратегия или системы обслуживания и ремонта – ТОР). Стратегию технического сервиса, нацеленную на замедление потери работоспособности машин, можно считать реальным и действенным фактором сопротивления их старению.

Для более полного представления сути отказов и возможных методов ликвидации их проявления здесь пока не будем однозначно любое событие вывода из эксплуатации квалифицировать как реальный отказ. Поскольку расширительное толкование понятия «отказ» увело управление техническим состоянием машин с пути научного его обоснования. Этим обстоятельством объясняется намерение рассмотреть вопрос профилактики старения более подробно.

Принимая к реализации стратегию использования элемента до предельного состояния (предельного износа), приходится считаться с немалой вероятностью непредусмотренного заранее ремонта или замены элемента и связанными с этим дополнительными издержками из-за вынужденного характера восстановительных работ. Эти издержки особенно велики в тех случаях, когда предельное состояние элемента ведет к реальному отказу от выполняемой машиной работы. Здесь потери от простоя могут превышать затраты на сам ремонт в десятки, сотни и даже тысячи раз. Представим себе, во что могут обернуться, например, потери при поломке компрессора рефрижератора, перевозящего в июне клубнику из Ташкента в Красноярск.

Для снижения вероятности подобных ситуаций, которые с полным правом можно и нужно называть отказом, используется диагностирование машин и стратегия упреждающих замен стареющих элементов. Здесь оправдано обоснованное недоиспользование их ресурса ради повышения безотказности работы.

В этих условиях предельное значение параметра технического состояния элемента не носит явно выраженный аварийный характер. Более того, оно чаще всего назначается по результатам экономического расчета и связано с постепенным ухудшением эффективности эксплуатации машины. В этом случае нет фатальной неизбежности неожиданного простоя с большими потерями. Но это решающее отличие от реального отказа весьма часто игнорируется. Игнорируют не только в хозяйственной практике, но и при создании технической документации на превентивную замену или ремонт элементов.

Главная проблема здесь – в умении оперативно оценивать техническое состояние элементов и взвешенного сопоставления полных издержек при отказе машины с затратами на его предупреждение, включая потери от недоиспользования технического ресурса. Это важнейшее обстоятельство необходимо учитывать при обосновании практических рекомендаций по обслуживанию машин операциями ремонта и замены.

В связи с тем, что технические отказы оказывают решающее влияние как на работоспособность стареющей машины, так и на процесс ее взаимодействия с системой ТОР, большое значение для разработки прикладных методик имеют законы распределения, которым подчиняется процесс их индикации. Наиболее часто для этих целей используются три закона распределения до технического отказа изделий стареющего типа: гамма-распределение, нормальное распределение и распределение Вейбулла. Как показывает анализ, наиболее полно согласуется с природой технических отказов двухпа-

раметрический закон Вейбулла. Широкое распространение этого закона при описании надежности стареющих машин и их составных частей во многом объясняется его универсальным свойством и при-

способностью при выравнивании распределений опытных значений таких сугубо положительных величин, как износ или продолжительность безотказной работы.

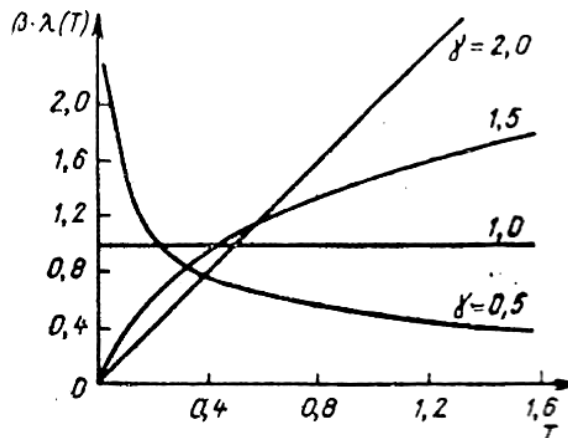


Рис. 1. Опасность отказа по распределению Вейбулла

При  $\gamma > 1$  опасность отказа монотонно возрастает от нуля, при  $\gamma < 1$  опасность отказа монотонно убывает и не ограничена при  $T=0$  (рис. 1). Экспоненциальный закон является частным случаем закона Вейбулла при  $\gamma = 1$  и пригоден, в этом случае, описывать опасность отказа (причиной которых не является старение элементов машин) с  $\lambda = \text{const}$ .

Таким образом, можно утверждать, что для описания процесса потери работоспособности машины, рассматриваемой как вероятностная система стареющих элементов, наиболее адекватен закон распределения Вейбулла. Это обстоятельство необходимо учитывать при осуществлении прикладных исследований по рассматриваемой здесь проблеме.

Формализованные процессы старения машины и восстановления ее работоспособности должны максимально адекватно отображать реальную картину этих процессов в условиях рядовой эксплуатации машин. Только в этом случае могут быть получены максимально эффективные прикладные результаты. Именно поэтому в настоящей работе машина представлена как вероятностная система стареющих элементов с неполным восстановлением.

Существующая литература о математических методах в теории надежности, тем более при решении задач для стареющих машин, исходит из предположения, что всегда осуществляется полное восстановление отказавшего элемента, т. е.  $q = 1$ . Возможность ограничить область действия этого грубого допущения – один из важнейших вопросов формализации процесса старения и восстановления работоспособности машин, представляющих собой систему изнашиваемых элементов с неполным последующим их восстановлением.

Если происходит технический отказ ремонтнопригодного элемента в машине, он может не только заменяться (как это происходит в радиоэлектронной сфере), но и ремонтироваться. Разница между этими двумя способами устранения последствий отказов заключается в уровне восстановления показателей надежности. Обозначим эту величину как  $q$ . При замене  $q = 1$ , при ремонте, как правило,  $q < 1$  (неполное восстановление).

В связи с тем, что машина представляет собой вероятностную систему  $1, 2, \dots, i, \dots, n$  элементов, то и каждый из них будет терять работоспособность (изнашиваться, утрачивать техническое состояние) в соответствии с  $F^1(t), F^2(t), \dots, F^i(t), \dots, F^n(t)$  и  $f^1(t), f^2(t), \dots, f^i(t), \dots, f^n(t)$ . В результате машина окажется источником отказов, появление которых будет описываться композицией законов распределения  $\Psi_n(x) = f_1 * f_2 * \dots * f_i * \dots * f_n$ , т. е. законом распределения суммы законов распределения. Это важнейшее обстоятельство оказывает радикальное влияние на разработку методических основ прикладных исследований. Уже на этом этапе формализации можно ожидать, что традиционное аналитическое описание исследуемых процессов невозможно (приводит к неразрешимым аналитически многомерным интегралам). Следовательно, и обычные экономико-математические модели (в которых аналогом объекта исследования является аналитическое выражение) тоже непригодны для исследования таких систем.

Кроме этого, сложность исследования усугубляется тем обстоятельством, что рассматриваемая нами машина, как вероятностная система старею-

щих элементов с неполным восстановлением, в терминах теории восстановления характеризуется общим процессом, относится к динамическим системам и имеет нестационарный поток требований на обслуживание для возобновления работоспособности системы.

Для описания общего процесса восстановления системы с одним элементом в терминах теории восстановления введем дополнительные обозначения:

$F(t)$  и  $f(t)$  – функция и плотность распределения до первого ресурсного отказа элемента машины;

$G(t)$  и  $g(t)$  – функция и плотность распределения до ресурсного отказа в межремонтном периоде использования элементов машины. Разделение на технические ресурсы в доремонтном периоде –  $R_{II}$  и в межремонтном –  $R_M$  обусловлено особенностью капитального ремонта элементов. В общем случае  $R_{II} \neq R_M$ ,  $R_M = q R_{II}$ , где  $q$  – степень восстановления технического ресурса элемента при его капитальном ремонте;

$H(t)$  – функция восстановления. В приложении к обслуживанию машины операциями ремонта и замены – среднее число восстановлений элементов от начала эксплуатации машины  $t = 0$  до  $t$ ;

$h(t)$  – плотность восстановления – среднее число восстановлений в единицу времени

$$(h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{H(t + \Delta t) - H(t)}{\Delta t} = \frac{dH}{dt}).$$

Как функция восстановления  $H(t)$ , так и плотность восстановления  $h(t)$  зависят от распределений величины безотказной наработки. С уменьшением величины среднего значения межремонтного ресурса  $\bar{R}_M$ , естественно, повышается интенсивность восстановления.

Связь между плотностью восстановления и плотностью распределения безотказной работы для общего процесса можно описать выражением

$$h(t) = f(t) + \int_0^t g(t - R_{II}) h(R_M) dR_M. \quad (3)$$

Тогда функция восстановления будет иметь выражение

$$H(t) = F(t) + \int_0^t H(t - R_{II}) g(R_M) dR_M. \quad (4)$$

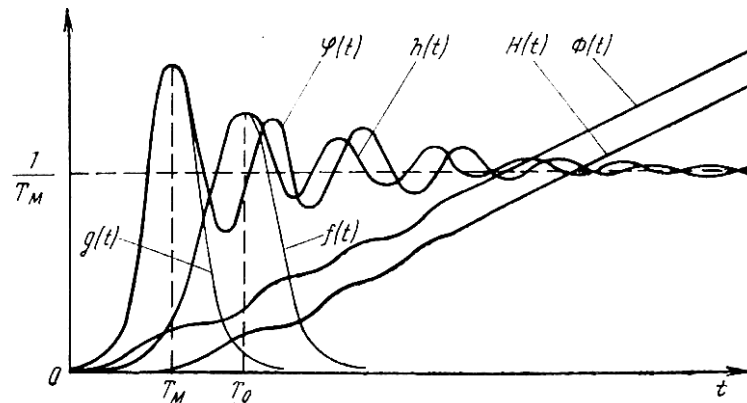


Рис. 2. Графики функций, описывающих процесс восстановления ремонтпригодной машины ( $H(t)$ ,  $h(t)$  – для общего процесса восстановления;  $\varphi(t)$ ,  $\Phi(t)$  – для простого)

Характерной особенностью функций  $\varphi(t)$  или  $h(t)$  является то, что их значения колеблются и лишь постепенно переходят к постоянной интенсивности восстановления, равной обратной величине средней наработке между отказами (среднему значению межремонтного срока службы). Функции же  $H(t)$  и  $\Phi(t)$  со временем становятся линейно возрастающим. Здесь  $\Phi(t)$  – функция восстановления для простого процесса (рис. 2).

Если отказы элементов в машине носят случайный характер, то и отказ машины как системы – есть случайная величина  $Z$ , являющаяся результатом

сложения случайных величин (отказов) составляющих ее элементов.

Пусть отказ системы зависит от отказов двух элементов, имеющих законы распределения до ресурсных отказов  $f(R_1)$  и  $f(R_2)$ .

Требуется определить плотность распределения  $Z$  (т. е. системы, машины). Если случайные величины  $R_1$  и  $R_2$  независимы, то задача сводится к определению композиции законов распределения  $f(R_1)$  и  $f(R_2)$  или к определению их свертки.

Произвести композицию (свертку) законов распределения – это значит найти закон распределения их суммы.

В соответствии с теоремой о композиции законов, плотность распределения отказов машины (системы) будет выглядеть следующим образом:

$$\Psi(Z) = f(R_1) \cdot f(R_2) = \int_a^b f_1(z - R_2) f_2(R_2) dR \cdot (5)$$

Тогда плотность восстановления отказов системы, техническое состояние элементов которой с течением времени убывает, определится:

$$h_n(x) = \sum_1^K \Psi_n(x), \quad (6)$$

где  $K$  – число восстановлений за срок службы  $T_c$ .

**Выводы.** В процессе формализации природы старения и восстановления работоспособности машин, рассматриваемых как вероятностная система стареющих элементов с неполным восстановлением, обозначены характерные особенности, которые необходимо учитывать при разработке эффективных прикладных методик, по обоснованию принципиально новых по содержанию управляющих нормативов системы ТОР машин.

Корневая суть нормативов – количественная оценка изношенности машины в целом. Использование нормативов такого содержания способствует переходу к прогрессивной стратегии обслуживания машин – по фактическому техническому состоянию и открывает возможности для максимально-допустимой реализации их технического ресурса.

### Литература

1. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

2. Михлин В.М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники. – М.: Колос, 1984. – 335 с.
3. Система технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин по результатам диагностирования. – М.: Изд-во ГОСНИТИ; Информатротех, 1995. – 64 с.
4. Ушанов В.А. Проблемы и результаты поиска новых нормативов системы ТОР машин и их использование на рынке технических услуг в АПК / Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2005. – 267 с.
5. Гальперин А.С., Михлин В.М. Резервы снижения вероятности отказа и повышения фактически используемого ресурса элемента машины // Машинно-технологическая станция. – 2008. – № 6. – С. 10–13.

### Literatura

1. Gnedenko B.V., Beljaev Ju.K., Solov'ev A.D. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. – М.: Nauka, 1965. – 524 s.
2. Mihlin V.M. Upravlenie nadezhnost'ju sel'skhozajstvennoj tehniky. – М.: Kolos, 1984. – 335 s.
3. Sistema tehničeskogo obslužhivanija i remonta sel'skhozajstvennyh mashin po rezul'tatam diagnostirovanija. – М.: Izd-vo GOSNITI; Informagroteh, 1995. – 64 s.
4. Ushanov V.A. Problemy i rezul'taty poiska novyh normativov sistemy TOR mashin i ih ispol'zovanie na rynke tehničeskikh uslug v APK / Krasnojarsk. gos. agrar. un-t. – Krasnojarsk, 2005. – 267 s.
5. Gal'perin A.S., Mihlin V.M. Rezervy sniženija verojatnosti otkaza i po-vyšhenija faktičeski ispol'zuemogo resursa jelementa mashiny // Mashin-no-tehnologičeskaja stancija. – 2008. – № 6. – S. 10–13.

