

## ОПЕНКА И АНАЛИЗ ДОСТИГНУТОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ СЕРИЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТИПА СМД В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Сыромятников П.С. – инженер, Козьменко Д.О. - студент  
(Харьковский государственный технический университет сельского хозяйства)

*Обгрунтовано та розроблено методику розрахунку ресурсів поверхонь і деталей представлено розрахунки нормативних параметрів зношування поверхонь, які забезпечують нормативний ресурс деталі.*

Повышение производительности качества и долговечности тракторов и сельскохозяйственных машин, выпускаемых машиностроением Украины в настоящее время, является актуальной задачей [1].

Сопоставление перспективных нормативов и реальных значений гамма процентных ресурсов деталей дизельных двигателей типа СМД при эксплуатации в хозяйствах показывает, сто ресурс основных деталей должен быть увеличен от 2 до 5 раз, т. е. необходимы конструкторские и технологические разработки, обеспечивающие существенное повышение ресурса деталей. Такие разработки базируются в основном на данных о фактических ресурсах деталей двигателей [2], эксплуатирующихся как непосредственно в хозяйствах, так и на МИС (машинно – испытательных станциях).

Основная задача состоит в том, что бы используя эту информацию, разработать методы расчета и рассчитать ресурсы рабочих поверхностей и деталей, а также обосновать нормативные параметры долговечности рабочих поверхностей для каждого наименования детали, обеспечивающее нормативный ресурс для детали в целом.

В настоящих исследованиях для оценки ресурса деталей использовалась информация об износах их поверхностей, формируемая по данным микрометрирования деталей двигателей типа СМД поступающих в первый капитальный ремонт в дальнейшем “ремонтная информация”, а также данных МИС.

Как показал анализ [3], ремонтная информация имеет свои особенности и при построении динамики изнашивания необходимо обязательно их учитывать.

В ходе выработки подходов и создания методики расчета ресурсов поверхностей и деталей последовательно были решены ряд взаимосвязанных задач [4, 5]:

– выбраны и обоснованы статистические модели процесса изнашивания и разработка программ для имитационного моделирования реализаций процесса на ЭВМ;

– выбрана и обоснована вероятностная модель формирования ремонтной информации, которая с определенной степенью достоверности была бы адекватна экспериментальной информации об износах деталей двигателей, поступающих в капитальный ремонт;

- разработана методика расчета гамма – процентного ресурса поверхностей детали;
- разработана методика оценки ресурса рабочих поверхностей при заданном гамма – процентном ресурсе детали в условиях наличия корреляционной связи между износами поверхностей;
- разработка нормативных параметров изнашивания, обеспечивающих нормативный ресурс детали.

Для анализа проявления особенностей ремонтной информации разработаны статистические модели, имитирующие различные виды процесса изнашивания и формирования ремонтной информации.

Предложенная статистическая модель изнашивания может имитировать реализации веерного процесса (учитывает только вариации начального качества детали), процесса с сильным перемешиванием (учитывает только вариации эксплуатационных условий) и процесса со слабым перемешиванием (учитывает вариации обоих факторов). Кроме того, модель универсальна и по возможности изменения вила зависимости общей средней скорости изнашивания от времени (скорость постоянная во времени, возрастающая или убывающая).

В результате анализа сделан вывод о том, что для решения поставленных задач исследования целесообразно и возможно принять линейную модель процесса изнашивания со слабым перемешиванием без учета периода приработки, занимающего малый участок наработки, которая в дискретной форме (для постановки машины экспериментов) имеет вид:

$$U(t_i, \kappa) = \sum_{j=1}^{\kappa} b(1 + V_{\xi} Z_{\xi_i}) (1 + V_{\mu} Z_{\mu_{i,j}}) \Delta t_j, \quad (1)$$

где  $U(t_i, \kappa)$  - накопленный износ для  $\kappa$ -го интервала в  $i$  – й реализации;

$b$  - общая средняя скорость изнашивания для всей совокупности реализации процесса;

$V_{\xi}$  - коэффициент вариации, учитывающий варьирование скорости изнашивания вследствие различного начального качества изделий, т. е. не зависящий от времени (номера интервала наработки);

$V_{\mu}$  - коэффициент вариации, учитывающий варьирование скорости изнашивания вследствие изменения условий эксплуатации во времени (в интервалах наработки) в каждой реализации;

$V_{\mu}$  принят постоянным для всех реализаций;

$Z_{\xi_i}$  и  $Z_{\mu_{i,j}}$  - нормированные случайные величины, распределенные по любому закону, имеющие математические ожидания равные нулю и дисперсии, равные единице;  $Z_{\xi_i}$  - зависит только от номера реализации, а  $Z_{\mu_{i,j}}$  - зависит

как от номера реализации, так и от номера интервала наработки. В исследованиях принято, что  $Z_{\xi_i}$  и  $Z_{\mu_{i,j}}$  распределены нормально, а коэффициент вариации  $V_{\xi} = V_{\mu} = 0,3$ .

$\Delta_j$  - интервал наработки; значение  $\Delta_j$  принято постоянным для всех интервалов наработки.

Каждая реализация определяется совокупностью значений износа (точек), рассчитанных по модели на ЭВМ. Точки расположены в сечениях на границах интервалов наработки. Всю совокупность реализаций можно рассматривать как эталонную информацию, поскольку по ней могут наиболее плотно и точно оцениваться статистические параметры процесса изнашивания и гамма – процентный ресурс условной детали. Эталонная информация использовалась в качестве исходной для выбора имитационной модели формирования ремонтной информации с учетом того, что в реальных условиях эксплуатации отбор двигателей в капитальный ремонт не являются равновероятным.

Методический подход к решению вопроса о формировании ремонтной информации состоял в следующем. Совокупность реализаций обрабатывалась по сечениям наработки, которая соответствовала границам интервалов. В каждом сечении число точек равно числу реализаций. Из такого ряда точек в сечении выбирается случайным образом одно значение износа, после чего остальные точки этой реализации исключаются из дальнейшего рассмотрения. Таким образом, если в эталонной информации содержится  $k$  и точек ( $k$  – число интервалов,  $i$  – число реализаций), то в ремонтной информации  $i$  значений. Число оставшихся точек в каждом интервале ремонтной информации должно соответствовать частотам, рассчитанным исходя из распределения вероятностей случайной величины по нормальному закону, т. е. закону, которому, как установлено, подчиняется распределение наработки двигателей, поступающих в капитальный ремонт.

В случае, когда случайный отбор точек в сечениях подчиняется равномерному закону распределения вероятностей, то статистические параметры процесса изнашивания, рассчитанные для ремонтной и эталонной информации статистически равноценны. Однако, как указывалось выше, в реальных условиях эксплуатации машин в хозяйствах отправка двигателей в капитальный ремонт имеет некоторый направленный характер, т. е. неравновероятная.

Отправка двигателей в капитальный ремонт определяется вообще говоря их техническим состоянием, поэтому двигатели, имеющие менее износостойкие экземпляры деталей попадают в ремонт с меньшей наработкой и наоборот, более износостойкие “выживают” и попадают в ремонт с большими наработками при значениях износов часто близким и даже меньшим, чем у деталей с меньшей наработкой, что влияет на искажение параметров уравнения динамики изнашивания, определяемых по экспериментальным данным, завышая, как правило, расчетное значение гамма – процентного ресурса.

Для анализа применимости того или иного вида распределения вероятностей отбора точек в сечениях реализаций с целью формирования ремонтной информации, использовалось треугольное распределение, с помощью которого можно варьировать распределение от равномерно возрастающей до равномерно убывающей вероятности. При этих условиях анализировались все три вида процесса изнашивания, рассмотренные выше.

Дисперсионный факторный анализ результатов машинных экспериментов, а также использования эталонной информации для аналитического сопоставления с вариантами сформированной ремонтной информации для разных условий отбора износов, показали, что при распределении отбора в сечениях с равномерно убывающей вероятностью модель сформированной ремонтной информации с достаточной степенью близости отражает экспериментальную информацию. При этом установлено, что определения статистических параметров процесса изнашивания по фактическим данным по износах деталей двигателей, поступающих в ремонт, может быть выполнено при условии введения в уравнение динамики изнашивания поправочных коэффициентов и параметров, значения которых рассчитаны по совокупности результатов исследования.

Для расчета гамма – процентного ресурса рабочей поверхности детали используется верхняя доверительная граница уравнения процесса изнашивания со слабым перемешиванием с учетом зависимости дисперсии износа от наработки, которая содержит поправочные параметры, что связано со статистическими особенностями ремонтной информации.

Уравнения доверительной границы имеет вид:

$$U_{np} = \frac{U}{0,95i} t_{\gamma} + Z_{\gamma} S'_p \left( \frac{i_{\gamma}}{i'_p} \right)^{0,85} \quad (2)$$

где  $U_{np}$  - предельное значение параметра (износ, зазор и др.);

$U$  и  $i$  - общие средние значения износа и наработки в выборке, рассчитанные по ремонтной информации;

$S'_p$  и  $i'_p$  - среднее квадратическое отклонение износа и значение наработки в среднем интервале разбиения выборки;

$Z_{\gamma}$  - квантиль нормального распределения;

$i_{\gamma}$  - гамма – процентный ресурс.

Зависимость [2] применима для больших выборок (более 70-80 изделий), которая разбивается по наработке на нечетное число интервалов (7-9) для получения достаточно надежных значений параметров  $S'_p$  и  $i'_p$ .

Расчет  $i_{\gamma}$  выполняется по методу последовательных приближений.

Следующей задачей исследования являлась разработка методики расчета ресурса детали, имеющей несколько рабочих (изнашиваемых) поверхностей. Предпосылкой для разработки методики является способ расчета ресурса детали по распределению минимальных значений из ресурсов всех поверхностей, принадлежащих каждому экземпляру детали. Реализация этого способа базировалась на разработанной статической модели процесса изнашивания (1) преобразованной к виду, позволяющему прогнозировать реализации процесса изнашивания до момента достижения предельного параметра.

Статистическая дискретная модель для расчета ресурса поверхностей и детали имеет вид:

$$t_i = t_i^{\circ} + \sum_{h=1}^{m_i} \frac{\Delta U_i}{b(1+V_{\xi}Z_{\xi_i})(1+V_{\mu}Z_{\mu_{i,h}})} \quad (3)$$

где  $t_i$  - наработка до предельного параметра (износ, зазор и др.) для  $i$ -й реализации;

$t_i^{\circ}$  - начальное значение наработки (по данным ремонтной информации), с момента которой ведется прогнозирование реализации;

$h$  и  $\Delta U_i$  - номер шага и значение шага по износу для  $i$ -й реализации (для данной реализации  $\Delta U_i = const$ );

$m_i$  - число шагов для  $i$ -й реализации.

Содержание остальных обозначений аналогично тем, которые относятся к зависимости (1).

Расчет ресурса деталей по ремонтной информации с использованием модели (3) выполняется на ЭВМ в соответствии с разработанным алгоритмом, которым предусмотрен отбор минимального значения ресурсов из всех ресурсов рабочих поверхностей детали. Совокупность минимальных ресурсов и является выборкой, характеризующей распределение ресурса данного наименования.

Следует иметь в виду, что моделью (3) можно пользоваться для оценки ресурса отдельной поверхности и детали при больших и сравнительно малых (25-30) выборках.

Поскольку в руководящих нормативных документах задается гамма - процентный ресурс детали независимо от числа рабочих поверхностей, потребовалась разработка методики расчета вероятности безотказной работы поверхностей по заданному гамма для ресурса детали, а также разработка нормативной базы в виде нормативных значений скорости изнашивания рабочих поверхностей деталей, обеспечивающих с определенной вероятностью достижение детали нормативного гамма - процентного ресурса.

Зависимость для определения вероятности безотказной работы элементов (рабочих поверхностей) по известному значению вероятности безотказной работы системы (детали) с последовательным соединением элементов предложена с учетом следующих предпосылок:

- 1) вероятности безотказной работы всех элементов системы равны;
- 2) вероятность безотказной работы системы изменяется линейно относительно коэффициента корреляции между элементами системы.

При этих предпосылках получена следующая зависимость:

$$\gamma_c = \gamma_{\Sigma r} + \gamma_{\Sigma}^n (1-r) \quad (4)$$

где  $\gamma_c$  - вероятность безотказной работы детали;

$\gamma_{\Sigma}$  - вероятность безотказной работы рабочей поверхности;

$n$  - число поверхностей;

$r$  - коэффициент парной корреляции между износами рабочих поверхностей детали, который рассчитывается по экспериментальным данным как среднее из всей корреляционной матрицы.

$$r = \frac{\sum_{g=1}^m r_{i,j}}{m} \quad (5)$$

где  $r_{i,j}$  - коэффициент парной корреляции между износами  $i$ -й и  $j$ -й поверхностями ( $i \neq j$ );

$m$  - число парных коэффициентов корреляции  $g = 1, m$ ;  $m = \frac{n(n-1)}{2}$ ;  $n$  - число поверхностей детали.

В [5] приводится таблица расчетных значений вероятности безотказной работы рабочих поверхностей при вероятности безотказной работы детали равной 0,95 (по нормативу) для числа рабочих поверхностей от 2 до 10. Данные таблицы используются для практических расчетов нормативной скорости изнашивания поверхностей деталей по зависимости:

$$h^H = \frac{U_{np}}{t_{\gamma}^H [1 + Z_{\gamma_3} V_u(t_{\gamma})]} \quad (6)$$

где  $U_{np}$  - предельное значение параметров;

$t_{\gamma}^H$  - нормативный гамма - процентный ресурс детали;

$Z_{\gamma_3}$  - квантиль нормативного распределения для вероятности безотказной работы элемента  $\gamma_3$ , вычисленной по зависимости (4);

$V_u(t_{\gamma})$  - коэффициент вариации износа при значении  $t_{\gamma}$  (принят исходя из нормального распределения износа равным 0,3).

Объектом исследования надежности являлись детали дизельных двигателей типа СМД (СМД - 18 Н, 21, 22), поступивших на ремонтное предприятие в первый капитальный ремонт, а также двигатели, прошедшие испытание в условиях эксплуатации на МИС.

Для расчета совокупности статических оценок, характеризующих надежность поверхностей и деталей использовались данные о наработках двигателей и соответствующих им износах поверхностей деталей, полученные путем микрометрирования рабочих поверхностей основной группы деталей, определяющих ресурс двигателя в целом.

Расчеты статистических оценок ресурсов и нормативных параметров износостойкости поверхностей деталей произведены с учетом следующих исходных предпосылок: модель процесса изнашивания - линейная; распределение случайной величины износа при данной неработке (условное распределение) и распределение скорости изнашивания - нормальное; величина износа определяется относительно среднего чертежного размера; предельные значения износов поверхностей деталей принят по нормативному документу [6]; норма значения гамма процентного ресурса при гамма 0,95 равно 12 тыс. мот.-ч. Этому нормативу соответствуют расчетные значения средней скорости изнашивания поверхностей деталей за наработку 1000 мото.-ч.

При расчёте гамма процентных ресурсов поверхностей и деталей в качестве аппроксимирующего распределения принято двухпараметрическое распределение Вейбула.

Из данных, приведенных в таблице 2.1-2.27 [7] следует, что в условиях эксплуатации двигателей в хозяйствах нормативный ресурс  $t_{0,95} = 12000$  мото.-ч. практически не выдерживает ни одна деталь.

Для удобства анализа характеристик надёжности, используемого при разработке конструкторских и технологических мероприятий по повышению долговечности деталей, приводится табл. 1, где представлены обобщённые данные о требуемой (нормативной) и фактической средней скорости изнашивания, а также их отношение, которое ориентирует на степень необходимого повышения износостойкости данной поверхности детали. Расчётные значения для нормативной средней скорости изнашивания соответствуют нормативному гамма-процентному ресурсу детали  $t_{0,95} = 12000$  мото.-ч. и конкретному нормативному значению предельного износа поверхности [6].

Таблица 1. Нормативные и экспериментальные оценочные показатели долговечности деталей.

Наименование детали поверхности	Средняя скорость изнашивания, мкм/1000 мото.-ч.		Отношение скоростей	Нормативное среднее значение износа при наработке 3000 мото.-ч., мкм
	нормативная	фактическая	Фактическая/нормативная	
1	2	3	4	5
Блок-картер				
отверстие под коренные вкладыши	3,82	16,0	4,2	11
отверстия под опорные шейки (в.3) распределительного вала	10,43	27,3	2,6	31
Полушильник распредвала				
отверстие подшипника (втулка)	11,16	107	9,6	34
Сетка цилиндров				
внутренняя поверхность	17,86	60,0	3,4	54
Шатун				
внутренняя поверхность нижней головки	3,98	19,2	4,9	12
внутренняя поверхность втулки верхней головки	6,53	24,6	3,8	20
Палец поршневой				
наружная поверхность под втулку шатуна	2,54	6,4	2,6	8
наружная поверхность под бобышки поршня	1,45	3,3	2,2	4
Поршень. Кольцо.				
зазор в канавке между поршнем и 1-м кольцом.	22,32	124,0	5,6	67
зазор в замке кольца	131,1	598,0	4,6	393
Вкладыши шатунные (толщина)				
верхние	4,74	20,4	4,3	14
нижние	4,74	13,9	3,0	14

1	2	3	4	5
Вкладыши коренные (толщина)				
- верхние	4,46	16,6	3,7	13
- нижние	4,46	36,5	3,1	13
Вал коленчатый				
- поверхность шатунных шеек	5,03	33,5	6,7	15
- поверхность коренных шеек	7,32	45,9	6,3	22
Вал распределительный				
- поверхность опорных шеек:				
передней	4,67	13,0	2,8	14
средней	4,38	12,4	2,8	13
задней	5,18	9,4	1,8	16
- поверхность кулачков (по высоте):				
впускных	36,0	117	3,3	108
выпускных	40,0	92,8	2,3	120
Втулка клапана				
- отверстие под клапан:				
впускной	12,41	24,5	2,0	37
выпускной	15,76	52,2	3,3	47
Клапан				
- поверхность стержня клапана:				
впускного	6,38	11,0	1,7	19
выпускного	3,91	10,8	2,8	12
Головка цилиндров				
- утопание тарелки клапана:				
впускного	174,0	312	1,8	520
выпускного	174,0	160	0,9	520

В табл. 1. даны также нормативные средние значения износа при наработке 3000 мот.-ч., которые могут быть использованы для экспресс оценки соответствия фактической долговечности нормативному значению ресурса при контрольных испытаниях.

В процессе исследования установлено, что разработанная методика оценки ресурса рабочих поверхностей деталей позволяет произвести расчеты гамма-процентного ресурса ремонтной информации для четырех уровней гамма-поверхностей 0,5; 0,8; 0,9; 0,95.

Рассчитаны нормативные скорости изнашивания поверхностей, исходя из нормативного 95 - процентного уровня долговечности деталей, равного 12 тысяч мото-ч. Установлены фактические скорости изнашивания поверхностей деталей.

Определены средние значения износов при наработке 3000 мото-ч., которые предназначены для экспресс-оценки соответствия долговечности поверхностей нормативному 95 - процентного ресурса детали при проведении износных испытаний.

Результаты проведенных испытаний целесообразно использовать при оценке долговечности тракторов и с.х. машин, выпускаемых машиностроением в настоящее время.

## Список литературы

1. "Вивести сільгоспмаш із кризи", газета "Урядовий кур'єр", №42(2705), 4 березня 2004р.
2. Лезин П.П. Формирование надежности сельскохозяйственной техники при ее ремонте /Под. ред. Ю.А. Вантюсова – Саратов: Из-во Саратов. Ун-та, 1987-1995.: ил. 20.
3. Оценка ресурса деталей двигателей типа СМД по информации, полученной на ремонтных предприятиях. /Полисской А.Я., Сыромятников П.С.//Прогрессивные методы восстановления изношенных деталей с.-х. машин Сб. науч. тр. /УСХА.- Киев.1988.
4. Разработка методики оценки ресурса детали на примере двигателя типа СМД / Сыромятников П.С.// Сб. науч. тр. «Повышение надежности восстанавливаемых деталей машин» ХГТУСХ, Харьков, 1997г.
5. Разработка методики расчета нормативной скорости изнашивания поверхностей по нормативному заключению гамма - процентного ресурса детали / Сыромятников П.С.// Сб. науч. тр. «Повышение надежности восстанавливаемых деталей машин» ХГТУСХ, Харьков, 1997г.
6. Критерии предельного состояния и допустимости дальнейшего использования деталей и сопряжений двигателей СМД-14НГ и СМД-18Н. ГСКБД, НПО НАТИ, НИКТИД, ГОСНИТИ – М.: 1986. – 21с.
7. Анализ и оценка достигнутого уровня надежности основных деталей серийных двигателей типа СМД в условиях реальной эксплуатации: Отчет о НИР (заключительный) / Харьковский институт механизации и электрификации сельского хозяйства (ХИМЭСХ). Руководитель А.А. Науменко. №ГР 01.86.0032090. Инв.№ 029.10.046492, 1989г. – 110с.

### Аннотация

Оценка и анализ достигнутого уровня надежности основных деталей серийных двигателей типа СМД в условиях реальной эксплуатации.

*Обґрунтовано та розроблено методику розрахунку ресурсів поверхонь і деталей. Представлено розрахунки нормативних параметрів зношування поверхонь, які забезпечують нормативний ресурс деталі.*

### Abstract

Estimation and the analysis of the achieved level of reliability of the basic details of serial engines such as SMD in conditions of real operation

*It is grounded and developed method of computation of resource of surfaces and details. Computations of normative parameters of threadbare surfaces which provide the normative resource of detail are presented.*