

## ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ЗАМЕН ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕКУЩИХ РЕМОНТОВ АГРЕГАТОВ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

**В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по решению проблемы обоснования стратегии текущего ремонта двигателей внутреннего сгорания на основе использования ремонтных комплектов их замен.**

Известно, что общая наработка изделия за срок его службы зависит как от уровня его исходного качества, так и от принятой стратегии поддержания его работоспособности. Последнее обстоятельство обусловлено использованием наиболее целесообразной системы эксплуатационного резервирования. В настоящее время наиболее распространенным способом эксплуатационного резервирования является подетальная замена отказавших деталей в изделии. Негативные последствия проявляются в силу характера прирабатываемости заменяемой детали, в сокращении срока ее службы на 30...40%. Одновременно ускоренный износ замененной детали приводит к повышенной интенсивности изнашивания рабочих поверхностей сопряженных с ней деталей. Более прогрессивной является стратегия комплектной замены, использование которой обеспечивает увеличение общей наработки предельного состояния, уменьшение расхода запасных частей, снижение потерь прибыли от сокращения длительности пребывания изделия в ремонте. Однако, несмотря на ряд выполненных исследований, теоретическое обоснование и

разработка структуры и периодичности замен ремонтных комплектов решены не полностью. Одним из наименее разработанных вопросов является установление взаимосвязи между показателями ремонтпригодности и принятой стратегией текущего ремонта.

Оценка показателя ремонтпригодности (РП) изделий универсальным комплексным показателем.

В действующей нормативно-технической документации рекомендуется использовать комплекс показателей для оценки РП. Практика их использования утверждает, что они нуждаются в дополнительных показателях, которые отвечали бы требованиям универсальности и комплексности.

Универсальность показателя заключается в том, чтобы он позволяет оценивать уровень ремонтпригодности изделия как относительно самого себя, так и вышестоящего иерархического уровня, в который он входит составной частью. Возможная взаимосвязь нескольких иерархических уровней представлена на рисунке 1.

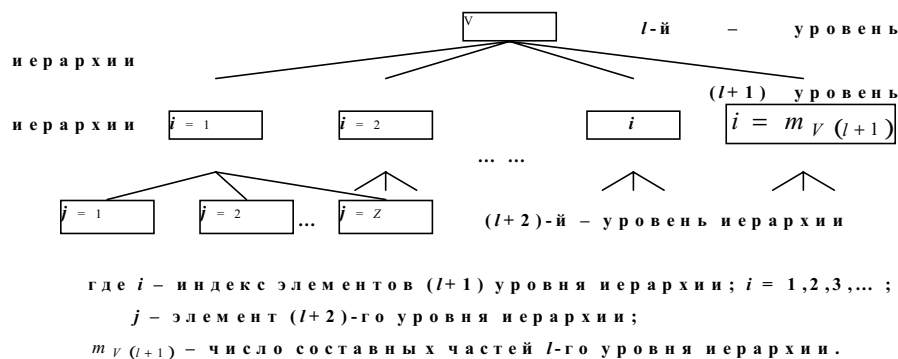


Рисунок 1 – Взаимосвязь нескольких последовательных иерархических уровней

Комплексность показателя РП заключается в использовании показателя удельного полезного эффекта в виде

$$\varepsilon \sim K \frac{t}{S}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент повторного использования массы элемента;  $t$  – межремонтная наработка;  $S$  – затраты на приобретение и ремонт за срок службы элемента. Зависимость свидетельствует о том, что удельный полезный эффект ремонтного воздействия на элемент тем выше, чем лучше используется его масса (металл), чем больше эффект от ремонта  $t$  и чем меньше затраты на обеспечение этого эффекта.

В результате предложен показатель для оценки РП элемента любого иерархического уровня относительно самого себя.

Формула в развернутом виде записывается выражением:

$$P_{r(i,l+1)}^{(l+1)} = K_{r(i,l+1)} \cdot (2)$$

Аналогично определяется показатель ремонтпригодности  $i$ -го элемента иерархического уровня  $V$ -го элемента вышестоящего  $l$ -го иерархического уровня. Величина этого показателя находится из выражения:

$$P_{r(i,l+1)}^l = K_{r(i,l+1)} \cdot \frac{S_{H(i,l+1)}}{S_{P(i,l+1)} + r(S_{PC(i,l+1)} + S_{H(i,l+1)})} \cdot \frac{t_{P(i,l+1)}^*}{t_{H(i,l+1)}}. \quad (3)$$

В этих формулах:

$t_{P(i,l+1)}$  – величина наработки элемента за один межремонтный цикл;  $t_{H(i,l+1)}$  – наработка элемента за доремонтный цикл;  $S_{H(i,l+1)}$  – затраты на приобретение нового элемента;  $S_{P(i,l+1)}$  – затраты на ремонт элемента на один межремонтный цикл;  $S_{PC(i,l+1)}$  – затраты на разборочно-сборочные работы, связанные с формированием элемента вышестоящего иерархического уровня;  $K_{r(i,l+1)}$  – коэффициент повторного использования массы деталей к  $r$ -му межремонтному циклу;  $r$  – число межремонтных циклов;  $t_P^*$  – приведенная межремонтная наработка, определяемая соотношением

$$t_{P(i,l+1)}^* = \begin{cases} t_{P(i,l+1)}, & \text{если } t_{P(i,l+1)} \leq \\ t_{H(r,l)}, & \text{если } t_{P(i,l+1)} > \end{cases} \quad (4)$$

Анализ формулы (2) и (3) показывает, что на

величину показателя РП существенное оказывает стратегия устранения отказов, что проявляется в объеме балластных работ, качестве ремонта (величина межремонтной наработки), стратегии повторно используемых деталей (масса) и другие факторы.

В этой связи возникает необходимость обоснования стратегии устранения отказов агрегатов транспортных машин (глубина ремонтных воздействий, периодичность их проведения). Решения этой задачи базируется на основе использования экономико-математических методов.

Математическая постановка задачи. Пусть  $t^M$  характеризует последовательность отказов  $M$  элементов:

$$t^M = (t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_M) \subset M, \quad (5)$$

где  $t_j$  – значение наработки  $j$ -го элемента;  $M$  – число заменяемых элементов двигателя.

Среди множества элементов отбираются те, которые лимитируют ресурс агрегата, и замена которых требует его разборки.

Введем ряд терминологических понятий.

Под ремонтным комплектом понимается совокупность его деталей в сборе, объединенная функциональным единством и образующая замкнутую группу с полной технологической совместимостью. Ремонтные комплекты подразделяются на базовые ремонтные комплекты (БК) и сменяемые ремонтные комплекты (СК). БК отличаются от СК тем, что его отказ влечет за собой капитальный ремонт агрегата и, как следствие, замену всех сменяемых РК.

С учетом этого, схема объединения элементов в ремонтный комплект может быть представлена рисунком 2.

В приведенной схеме, на рисунке 2а –  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_M$  – наработки до отказов  $M$ -х элементов; на рисунке 2б –  $E_i, \dots, E_n$  – комплекты одновременно заменяемых элементов.

В формализованном виде указанная схема имеет вид:

$$U^N = (U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_N) \subset U, \quad (6)$$

$$N \leq M; U_i \leq t_j.$$

где  $U_i$  – регламентируемое значение наработки элементов в  $i$ -ом ремонтном комплекте;  $N$  – число ремонтных комплектов.

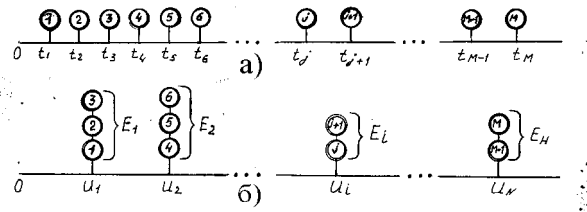


Рисунок 2 – Схема объединения элементов в ремонтные комплекты

а) требуемая периодичность при подетальной замене;

б) комплекты  $E_i$  и периодичность их замены  $U_i$ .

Введение ремонтных комплектов уменьшает время на замену элементов и длительность приработки. В то же время, одновременная замена нескольких элементов разной долговечности приводит к появлению потерь от недоиспользования ресурсов элементов. С учетом этого, целевая функция обоснования оптимальной системы поддержания работоспособности до капитального ремонта может быть записана в виде:

$$S = f(\Delta A_{E_i}, \Delta B_{E_i}, \Delta C_{E_i}, \Delta \Gamma_{E_i}) \quad (7)$$

где  $\Delta A_{E_i}$ ,  $\Delta B_{E_i}$ ,  $\Delta C_{E_i}$  – потери от простоя, недоиспользования ресурса и приработки при комплектной замене группы элементов;  $\Delta \Gamma_{E_i}$  – затраты на оплату труда ремонтных рабочих при замене элементов.

Оптимальная система замен изношенных элементов имеет вид:

$$S^* = \min S; \quad U_i \in U; \quad t_j \in t; \quad N > 0, \quad (8)$$

Расчет составляющих целевой функции (7) производится по ряду известных методик. На основании этого целевая функция может быть представлена в виде:

$$S^* = \gamma_1 \sum_{j=1}^{E_i} \tau_j + \gamma_2 \sum_{j=1}^{E_i} \tau_j + \sum_{j=1}^{E_i} C_j \cdot \left( \frac{t_j - U_i}{t_j} \right) + \frac{D}{t_\Sigma \cdot C_a} \sum_{i=1}^{E_i} C_j \cdot (t_j - U_i) + \frac{\beta}{C_a} \cdot \left[ \sum_{j=1}^{E_i} C_i - \sum_{j=1}^{E_i} (\max_{E_i} C_j) \right] \rightarrow \min S, \quad (9)$$

при  $U_i \in U; \quad t_j \in t; \quad N > 0$ .

В целевой функции:  $\gamma_1$  – величина потерь от простоя транспортных машин в единицу времени;  $\sum_{j=1}^{E_i} \tau_j$  – разность простоя при подетальной и комплектной стратегиях замен;  $\gamma_2$  – стоимость нормо-часа работ;  $\sum_{j=1}^{E_i}$  – разность

трудоемкостей при проведении подетальной и комплектной стратегии замен;  $C_j$  – стоимость нового элемента;  $t_j$  – наработка элемента до отказа;  $U_i$  – минимальная наработка ремонтного комплекта;  $C_a$  – стоимость нового автомобиля;  $t_\Sigma$  – суммарная наработка автомобиля;  $D$  – величина дохода при эксплуатации автомобиля;  $\beta$  – доля уменьшения наработки из-за проведения приработки.

Графическая модель решения целевой функции представлена на рисунке 3.

62

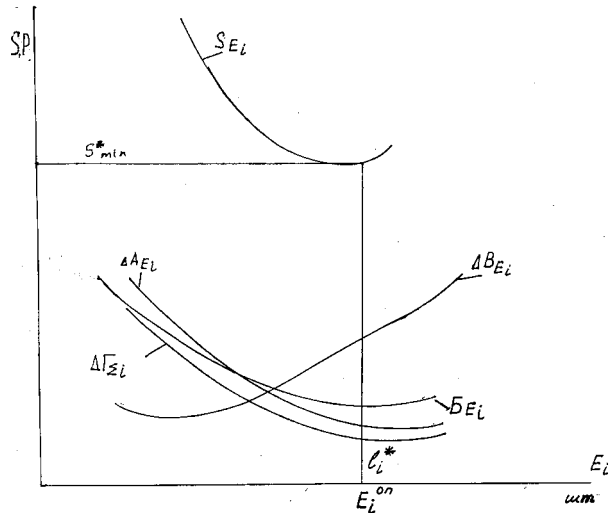


Рисунок 3 – Графическая модель решения целевой функции

В качестве метода оптимизации группирования деталей в ремонтные комплекты используется идея направленного перебора.

$$\text{Пусть } \left. \begin{array}{l} P(t_j) \in P_c \\ Z(U_i) \in R \end{array} \right\} \quad (10)$$

где  $P(t_j)$  – вектор фазовых координат, под которой понимается наработка элементов ав-

томобиля;  $Z(U_i)$  – вектор управлений, то есть множество воздействий в определенные моменты времени, направленных на восстановление работоспособности двигателя.

Векторы (10) изменяются в ограниченной области, что представлено рядом фазовых ограничений,

$$\left. \begin{aligned} P(t_j) \in H_p \\ Z(U_i) \in H_z \end{aligned} \right\}$$

к которым отнесены ограничения наработку до проведения ремонтных воздействий. Кроме этого, вводятся краевые условия решения задачи в виде начальных условий

$$P^o(t_j) \in E_o, \quad (12)$$

и конечных условий

$$P^k(t_j) \in E_k. \quad (13)$$

Оптимальную систему ремонта определяет минимальная величина затрат, зависящая от состояния автомобиля и управляющих воздействий

$$\left. \begin{aligned} S[P(t_j)Z(U_i)] = S^* \rightarrow \min \text{ при } P(t_j) \in H_p; \\ Z(U_i) \in H_z. \end{aligned} \right\}$$

Экспериментальная проверка методики оптимизации структуры и периодичности ремонта двигателей методом комплектной замены проведена по специально проведенному экспериментальному исследованию отказов двигателей автомобиля КамАЗ-740 в условиях ремонтных зон АТП, ООО «Авторемзавод» и Автоцентра КамАЗ г. Оренбурга.

Решение поставленной задачи проведено по специально разработанной программе с использованием ПЭВМ на базе процессора Intel Pentium II. В результате проведенных расчетов, разработаны экономически целесообразные ремонтные комплекты и периодичности их замен, представленные в таблице 1.

№№ комплект а	Наименование деталей, формирующих ремонтный комплект	Периоды замены, км.
1	2	3
I	Комплект поршневых колец	82
II	Комплект коренных и шатунных вкладышей	108
III	Комплект поршневых колец Комплект гильз Комплект коренных и шатунных вкладышей	138
IV	Вал коленчатый с комплектом вкладышей Поршневая группа Вал распределительный Головка блока цилиндров в сборе	164

Таблица 1 – Состав ремонтных комплектов двигателя КамАЗ-740 и периодичности их замены

Кроме этого, уточнены значения показателей РП основных деталей газораспределительного механизма двигателя КамАЗ-740 при поддетальной (числитель) и комплектной стратегиях (знаменатель) проведения текущего ремонта, что представлено в таблице 2.

№ пп	Наименование детали	Показатель РП		
		собственный	относительно ГРМ	относительно ДРС
1	Головка блока цилиндра	0,345	$\frac{0,416}{0,519}$	$\frac{0,697}{0,758}$
2	Клапан впускной	0,110	$\frac{0,201}{0,300}$	$\frac{0,763}{0,830}$
3	Клапан выпускной	0,119	$\frac{0,196}{0,253}$	$\frac{0,751}{0,815}$
4	Стойка коромысел	0,170	$\frac{0,257}{0,341}$	$\frac{0,691}{0,877}$
5	Коромысло впускного клапана	0,122	$\frac{0,193}{0,256}$	$\frac{0,608}{0,743}$
6	Вал распределительный	0,120	$\frac{0,267}{0,315}$	$\frac{0,595}{0,715}$
7	Коромысло выпускного клапана	0,127	$\frac{0,197}{0,264}$	$\frac{0,624}{0,701}$
8	Толкатель	0,129	$\frac{0,201}{0,299}$	$\frac{0,531}{0,699}$
9	Штырь толкателя	0,059	$\frac{0,118}{0,141}$	$\frac{0,518}{0,703}$

- числитель – поддетальная замена;  
- знаменатель – комплектная замена.

Таблица 2 – Результаты расчета показателей РП газораспределительного механизма

Анализ полученных показателей РП, показывает целесообразность использования стратегии комплексной замены. Кроме

этого следует отметить, что использование последней приводит к значительному уменьшению числа ремонтных работ и, следовательно, однозначно повышает их ремонтпригодность. Кроме этого, значительно снижаются потери доходов владельцев автомобильного транспорта.

---

**Список использованной литературы**

1. Апсин В.П., Дехтеринский Л.В., Норкин С.Б., Приходько В.М. Моделирование процессов восстановления машин. – М.: Транспорт, 1996. – 311 с.
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с.
3. Бондаренко В.А. Концепция и технологические основы ремонта транспортных средств в условиях постиндустриальной экономики: Дис. докт. техн. наук. – Оренбург, 1996. – 52 с.
4. Волков П.Н. и др. Ремонтпригодность машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 386 с.
5. Дюмин И.Е. Повышение эффективности ремонта автомобильных двигателей. – М.: Транспорт, 1987. – 176 с.
6. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – М.: Транспорт, 1987. – 271 с.

**Статья поступила в редакцию 11.01.2000г.**