

## ДОЛГОВЕЧНОСТЬ РЕДУКТОРОВ ВЕДУЩИХ МОСТОВ АВТОМОБИЛЕЙ СЕМЕЙСТВА МАЗ-7313

Методы расчета долговечности деталей и узлов, используемые при проектировании и доводке автомобилей, характеризуются невысокой точностью и достоверностью расчета ресурсов. Это объясняется гипотетическим характером используемых зависимостей, статистическими свойствами предельных состояний и трудностью задания нагрузочных режимов, соответствующих реальным условиям эксплуатации [ 1 ]. Применение известных коэффициентов корректирования среднестатистических норм межремонтного пробега тоже не решает проблему, так как автомобили никогда не работают в строго постоянных условиях, а коэффициенты имеют средние значения.

В связи с этим актуально совершенствование методов решения практических задач по управлению уровнем надежности автомобилей и их агрегатов в различных условиях эксплуатации, что предполагает разработку и корректирование режимов их технического обслуживания и текущего ремонта (ТР). Цель управления – увеличение наработки на отказ, повышение ресурса агрегатов и узлов, уменьшение времени простоя в ТР и повышение на этом основании коэффициента технической готовности. Исходной информацией для управления являются результаты эксплуатационных испытаний автомобилей на надежность, а также результаты исследования физических закономерностей возникновения отказов, в частности интенсивности изнашивания рабочих поверхностей деталей.

Рассмотрим один из вариантов решения поставленной задачи на примере редукторов ведущих мостов автомобилей семейства МАЗ-7313. Испытания на надежность проведены методом подконтрольной эксплуатации автомобилей МАЗ-7310, МАЗ-7313 в условиях холодного климата на автотранспортном предприятии (АТП) № 7 производственно-строительного объединения "Арктиктрансгазстрой" г. Надыма Тюменской области. Перевозимый груз – плети длиной 36 м из труб диаметром 1420 мм, а также другие строительные материалы и техника для строительства трубопроводов. Эксплуатация в этих условиях осуществляется большей частью по временным зимним дорогам (зимникам). В весенне-летний период большинство автомобилей находится на консервации из-за отсутствия дорог, а часть используется для вывозки различных строительных материалов с барж (в районе порта Надым) на промышленные базы. Условия эксплуатации приведены ниже.

### *Эксплуатационные показатели*

Средняя эксплуатационная скорость, км/ч	36,4
Среднесуточный пробег, км	341
Средняя длина ездки с грузом, км	177
Среднее время в наряде, ч	10,2
Коэффициент использования грузоподъемности	1,17

*Дорожные условия (долевой пробег по дорогам различных типов, %)*

Бетонные плиты	1...5
Укатанный зимник в хорошем состоянии на равнинной местности	30...40
Укатанный зимник в хорошем состоянии на холмистой местности	20...25
Укатанный зимник в плохом состоянии (бугры, ямы)	25...30
Снежная целина, снежные заносы	5...15

*Метеорологические условия*

Среднегодовая температура воздуха, °С	-8,1
Интервал изменения температуры, °С	+30,2...-51,6
Количество дней с отрицательной температурой	218
Средняя влажность воздуха, %	71,7
Скорость ветра, м/с	6...20

Под наблюдением находится 61 автомобиль 1979–1986 годов выпуска. Сбор информации осуществляется в соответствии с рекомендациями действующих стандартов [2].

Средний срок службы автомобилей составляет 5 лет, пробег до списания — 140...220 тыс. км. При этом на момент списания часть агрегатов и узлов доведена до предельного состояния, другая — еще работоспособна. Это приводит к образованию цензурированных выборок, для которых классические методы расчета показателей долговечности неприемлемы. В связи с этим обработка экспериментальных данных проведена по специально разработанной программе, в которой реализован комбинаторный метод, предложенный Л.Джонсоном [3]. Программа адаптирована на ЭВМ типа ЕС и СМ-4. Экспериментальное распределение показателей надежности последовательно аппроксимировалось теоретическими законами распределения: нормальным; Вейбулла–Гнеденко; логарифмически-нормальным; экспоненциальным.

Расчеты показали, что распределение ресурса центральных редукторов хорошо согласуется с теоретическим законом распределения Вейбулла–Гнеденко. Основные характеристики распределения приведены в табл. 1.

Однако при выборе распределения недостаточно формального сходства экспериментальной гистограммы с теоретическим законом. Необходимо также учитывать физику явления, т.е. стремиться к рассмотрению полной модели отказов.

Изучение закономерностей изнашивания рабочих поверхностей деталей центральных редукторов проведено на специализированном авторемонтном заводе в г. Энгельсе Саратовской области методом микрометрирования. Ресурс  $R$  деталей (тыс. км) рассчитан по формуле

$$R = I_{\text{доп}} / I,$$

где  $I_{\text{доп}}$  — предельный износ, установленный техническими условиями на капитальный ремонт, мкм;  $I$  — интенсивность изнашивания, мкм/тыс. км.

Результаты исследований приведены в табл. 2, из которой следует, что основной причиной отказов редукторов является износ рабочих поверхностей их деталей. Редуктор рассматривается как система, состоящая из группы незави-

Табл. 1. Результаты расчета ресурсов центральных редукторов ведущих мостов статистико-вероятностным методом

Агрегат	Среднее значение, тыс. км	Доверительный интервал, тыс. км	Коэффициент вариации	γ-процентный ресурс, тыс. км (γ=90%)	Относительная ошибка, %
Центральный проходной редуктор	125,6	9,1	0,64	66,9	7,2
Центральный непроходной редуктор	156,4	7,1	0,32	90,3	4,5

Табл. 2. Ресурсы деталей, ограничивающих долговечность центральных редукторов ведущих мостов

Наименование детали	Наименование дефекта	Интенсивность износа, мкм/тыс. км	Ресурс, тыс. км
Фланец промежуточного карданного вала	Износ зубьев (шлицев)	1,957	38,3
Фланец привода ведущей конической шестерни	То же	1,706	46,9
Муфта зубчатая вала промежуточной опоры	”	2,556	48,9
Фланец зубчатый вала ведущей цилиндрической шестерни	”	1,468	54,5
Шестерня коническая полуоси	”	1,332	64,8
Полуось	Износ паза под выступ игольчатого подшипника	1,254	59,8
	Износ зубьев (шлицев)	1,827	82,1
Чашка дифференциала в сборе	Износ отверстия втулки под шестерню полуоси	0,871	80,3
Картер промежуточный проходного редуктора	Износ отверстий под роликоподшипники:		
	ведущей шестерни	0,743	79,2
	дифференциала	0,639	93,3
Крышка боковая	Износ отверстий под подшипники	0,441	118,6
Крышка промежуточная Картер подшипников	То же	0,444	123,1
	Износ гнезд под подшипники:		
	задний	0,492	126,1
	передний	0,391	136,2

симых элементов (деталей), отказ или неисправность каждого из которых приводит к отказу всей системы. В данной модели отказов рассматривается распределение пробега до предельного состояния системы как распределение соответствующих минимальных значений  $l_i$  отдельных элементов:  $L = \min(l_1, l_2, \dots, l_n)$ .

Таким образом, модель отказов рассматриваемой системы представляет классическую модель "слабого звена". Это подтверждает правильность выбора в качестве аппроксимирующего закона Вейбулла—Гнеденко.

Испытания на надежность показали, что реальные ресурсы деталей превышают их оптимальные значения, так как эксплуатация редукторов мостов продолжается до появления шумов и вибрации, когда износы значительно превышают допустимые. Реальные ресурсы некоторых деталей, рассчитанные статистико-вероятностным методом, приведены в табл. 3. Как видно из табл. 2 и 3, ресурс дифференциала в сборе составляет 83,1 тыс. км, в то время как расчетные ресурсы его основных частей — чашки дифференциала и шестерни полуоси — равны 80,3 тыс. км и 64,8 тыс. км соответственно. Фактический ресурс фланца промежуточного карданного вала составляет 57,5 тыс. км (расчетный 38,3 тыс. км), муфты зубчатой вала промежуточной опоры — 68,8 тыс. км (расчетный 48,9 тыс. км), фланца привода ведущей конической шестерни —

Табл. 3. Ресурсы деталей центральных редукторов, рассчитанные статистико-вероятностным методом

Наименование детали, узла	Закон распределения случайной величины	Среднее значение, тыс. км	Доверительный интервал, тыс. км	Коэффициент вариации	У-процентный ресурс, тыс. км ( $\gamma \approx 90\%$ )	Относительная ошибка, %
Фланец промежуточного карданного вала	Нормальный	57,5	9,8	0,59	29,5	17,7
Манжета уплотнительная фланцев	Вейбулла	58,8	21	0,38	29,6	31,2
Фланец привода ведущей конической шестерни непроходного редуктора	То же	63,9	12,9	0,59	31,3	20,3
Муфта зубчатая вала промежуточной опоры	"	68,8	13	0,39	33,8	19,2
Фланец привода ведущей конической шестерни проходного редуктора	"	70,4	15,6	0,33	40,7	22,4
Манжета уплотнительная полуоси	"	75,4	8,5	0,48	30,9	12,8
Дифференциал в сборе	"	83,1	6,8	0,13	43,5	37,1

70,4 тыс. км для проходного и 63,9 тыс. км для непроходного (расчетный 46,9 тыс. км).

Значения ресурсов представлены по сложившимся на АТП № 7 условиям и не являются оптимальными с точки зрения минимума затрат. При определении оптимального ресурса центральных редукторов ведущих мостов использовалась методика, предложенная в работе [4]. За критерий оптимизации принята минимальная сумма средних удельных затрат на приобретение агрегатов и на поддержание их в работоспособном состоянии, обеспечивающем постоянную, максимально возможную в данных условиях производительность:

$$C_{уд} = C_{пр}(l) + C_{п.н.ср.общ}(l) \rightarrow \min ,$$

где  $C_{пр}(l)$  – средние удельные затраты на приобретение (изготовление) агрегатов, р/тыс.км:  $C_{пр}(l) = C_0/l$ ;  $C_{п.н.ср.общ}(l)$  – общие средние удельные затраты на устранение отказов и неисправностей:  $C_{п.н.ср.общ} = C_{п.н.ср}(l) + C_{ТО}$ ;  $C_0$  – стоимость агрегата, р.;  $C_{п.н.ср}(l)$  – средние удельные затраты на устранение отказов и неисправностей, р/тыс. км;  $C_{ТО}$  – затраты на ТО, р/тыс.км.

Затраты  $C_{ТО}$  определялись исходя из трудоемкости работ ТО, часовой тарифной ставки ремонтного рабочего 1,98 р. (с учетом районного коэффициента 1,7, северной надбавки 1,8 и премиальных доплат 40%), стоимости эксплуатационных материалов и составляют 0,24 р./1000 км для непроходного редуктора и 0,41 р./1000 км для проходного.

Затраты  $C_{п.н.ср}(l)$  определены исходя из стоимости замененных деталей, трудоемкости их замены и часовой тарифной ставки ремонтного рабочего.

Динамика изменения средних удельных затрат представлена на рис. 1.

Аппроксимирование кривой роста средних удельных затрат на устранение отказов и неисправностей проведено методом наименьших квадратов по линейной, квадратичной и степенной зависимостям. Анализ результатов расчета позволил выявить, что аппроксимирующей является квадратичная зависимость вида

$$C_{п.н.ср}(l) = AL^2 + BL + C, \quad (1)$$

где  $A, B, C$  – коэффициенты;  $L$  – пробег автомобиля (кривая 2 на рис. 1).

Вывод о соответствии математической модели экспериментальным данным сделан на основании анализа расчетных и критических значений множественного корреляционного отношения  $\eta$ , указывающего на тесноту связи между аргументами, проверки значимости  $\eta$  с использованием  $T$ -критерия Стьюдента и проверки гипотезы об адекватности модели результатам наблюдений по значению  $F$ -критерия Фишера. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таким образом, суммарные удельные затраты на поддержание редукторов в исправном состоянии выражаются зависимостью (кривая 4 на рис. 1)

$$C_{уд} = AL^2 + BL + C + C_0/L + C_{ТО} \quad (2)$$

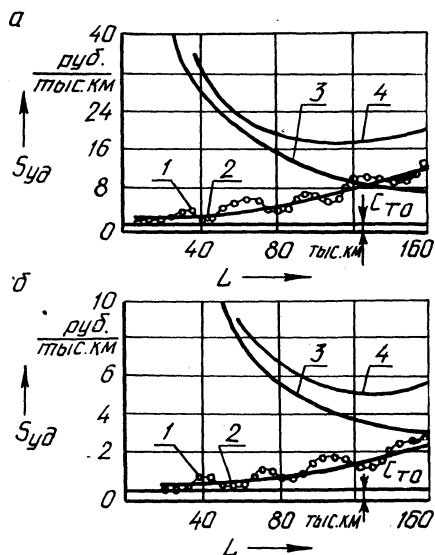


Рис. 1. Изменение удельных затрат на приобретение и поддержание работоспособного состояния редукторов ведущих мостов:

*a* – проходного; *б* – непроходного; 1 – удельные затраты на поддержание исправного состояния, экспериментальная кривая; 2 – аппроксимирующая теоретическая кривая; 3 – удельные затраты на приобретение; 4 – суммарные затраты

Для определения пробега, соответствующего минимуму затрат, возьмем производную уравнения (2) и приравняем ее к нулю (вторая производная положительна):

$$\begin{aligned} 2AL + B - C_0/L^2 &= 0; \\ 2AL^3 + BL^2 - C_0 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

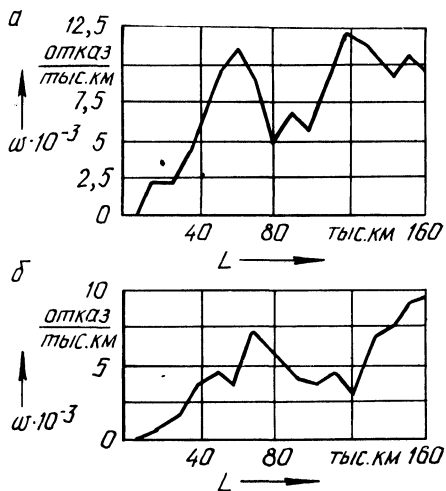
Табл. 4. Оценки коэффициентов регрессии и параметров адекватности модели

Наименование агрегата	Оценки коэффициентов регрессии			Оценки параметров адекватности модели				
	A	B	C	Множественное корреляционное отношение $\eta$	Значение F-критерия Фишера		Значение T-критерия Стьюдента	
					расчетное F расч	критическое F кр	расчетное T расч	критическое T кр
Проходной центральный редуктор	0,0112	0,499	-0,236	0,942	107,4	1,893	14,3	2,05
Непроходной центральный редуктор	0,0045	0,079	-0,226	0,979	295,8	1,893	14,3	2,05

Примечание. При определении коэффициентов регрессии уравнения (1) значения пробега  $L$  (км) умножают на  $10^{-4}$ , значение  $C_{п.н.ср}$  при этом получают в рублях на тысячу километров.

Рис. 2. Изменение параметра потока отказов центральных редукторов ведущих мостов:

*a* – проходного; *b* – непроходного



Уравнение (3) решено на программируемом микрокалькуляторе МК-52 итерационным методом последовательных приближений. Получено значение оптимального ресурса  $L_{\text{опт}} = 119,7$  тыс. км для проходного редуктора и  $L_{\text{опт}} = 144,6$  тыс. км для непроходного.

В то же время средний пробег автомобиля до списания – порядка 170 тыс. км. Поэтому актуальной является задача продления ресурса центральных редукторов до значений, близких к ресурсу автомобиля. Анализ результатов эксплуатационных испытаний показал, что данная задача может быть решена за счет проведения предупредительных и сопутствующих ремонтов во время летней консервации автомобиля. Это позволит снизить потери от его простоя, которые в настоящее время на АТП № 7 составляют 246,1 р/смену.

С этой целью проведен анализ динамики изменения показателей надежности по пробегу автомобиля за период его эксплуатации.

На рис. 2 представлено распределение параметра потока отказов, определяемое как

$$\omega(L) = \frac{\sum_{i=1}^N r_i(L + \Delta L) - \sum_{i=1}^N r_i(L)}{N\Delta L}$$

где  $N$  – число подконтрольных автомобилей в рассматриваемом интервале;  $\Delta L$  – интервал пробега (принято  $\Delta L = 10$  тыс. км);  $r_i(L)$  – число отказов за пробег  $L$ ;  $r_i(L + \Delta L)$  – число отказов за пробег  $L + \Delta L$ .

Все неисправности, устраняемые на одном пробеге, в расчетах приняты за один отказ. На наш взгляд, это правомерно, так как отражает систему ТО и ТР, сложившуюся в АТП.

С целью снижения потерь от простоев автомобилей, трудовых затрат на ТР и увеличения срока службы агрегатов предлагается осуществлять в межсезонное время следующие регламентные работы по центральным редукторам ведущих мостов. После первого года эксплуатации ( $\approx 34,8$  тыс. км) проводится проверка технического состояния зубчатых муфт и фланцев, которые при

необходимости заменяются. Предупредительная замена не предусматривается, так как эти детали характеризуются малой трудоемкостью замены. Последняя может осуществляться в межсменное время без потерь на простои.

После второго года эксплуатации ( $\approx 70$  тыс. км) практически выработаны ресурсы зубчатых муфт и фланцев, полуоси, ее конической шестерни, дифференциала, уплотнительных манжет (см. табл. 3 и 4), что приводит к значительному возрастанию параметра потока отказов (рис. 2). На этом пробеге необходимо проводить средний ремонт агрегатов с углубленным диагностированием их технического состояния. Так как автомобили работают в отрыве от основной производственной базы при длине ездки с грузом свыше 100 км, все детали, имеющие малый остаточный ресурс, подлежат замене. Потери от неиспользования их ресурса будут значительно меньше потерь, связанных с транспортировкой отказавшего на линии автомобиля, и потерь от простоя его в ремонте. Замене подлежат также уплотнительные манжеты, которые после двух лет эксплуатации в холодных условиях теряют эластичность и значительно изнашиваются.

На третьем году эксплуатации отмечается снижение параметра потока отказов (рис. 2). Проведение ремонта на пробеге около 70 тыс. км позволит уменьшить его еще больше. Поэтому проведение ремонтных работ, связанных со снятием и разборкой агрегата, на этом пробеге не предусматривается.

По завершении четырех лет эксплуатации ( $\approx 130$  тыс. км) отмечается повторное возрастание параметра потока отказов, вызванное износом некоторых корпусных деталей (крышка боковая, крышка промежуточная, картер подшипников), а также повторными отказами деталей, замененных на пробеге 70 тыс. км (полуось, шестерня коническая полуоси, зубчатые муфты и фланцы, уплотнительные манжеты).

На этом пробеге предусматривается повторный средний ремонт после углубленного технического диагностирования.

Проведение этих работ позволит увеличить ресурс центральных редукторов до 5 лет эксплуатации, т.е. до пробега 170 тыс. км, соответствующего пробегу автомобиля до списания, а также значительно снизить размах вариации наработки на отказ.

Результаты выполненных исследований переданы заводу-изготовителю для разработки конструктивно-технологических мероприятий по повышению долговечности деталей и узлов, ограничивающих надежность указанных агрегатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукинский В.С., Котиков Ю.Г., Зайцев Е.И. Долговечность деталей шасси автомобиля. Л., 1984.
2. ГОСТ 17526-72. Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Требования к содержанию форм учета наработок, повреждений и отказов.
3. Аронов И.З., Бурдасов Е.И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. М., 1987.
4. Шейнин А.М. Основные принципы управления надежностью машин в эксплуатации. М., 1977. Вып. 1.