

Выбор ремонтного воздействия на агрегаты транспортных средств на основе интегрального моделирования их остаточного ресурса

В статье проанализированы особенности организации ремонтных технических воздействий на агрегаты транспортных средств в России и за рубежом. Приведены результаты научных исследований по разработке альтернативной методики определения оптимального вида ремонта, направленной на повышение эффективности использования их ресурса и снижение материальных затрат в процессе эксплуатации. Представлено описание структуры управления процессом ремонта агрегатов автомобилей на основе интегральной оценки остаточной точности их размерных параметров.

Ключевые слова: *удельные затраты, агрегат, ремонт, износ деталей, показатели надежности, моделирование.*

К концу 2010 г. число автомобилей в мире приблизилось к 1 млрд ед. Каждый год выпускается около 50 млн новых машин и огромное число автозапчастей. В этих условиях важно проследить тенденцию возрастания ценности операций, направленных на восстановление работоспособного состояния агрегатов автомобилей. Задача ремонтных воздействий стала шире и уже не сводится только к цели восполнения дефицита парка автомобилей, которая была актуальна в советские годы. В настоящее время актуальность проведения ремонта в значительной степени обусловлена усложнением конструкции агрегатов автомобилей, ростом затрат на их изготовление, что в конечном итоге отражается на стоимости нового агрегата. Таким образом, ремонт направлен на повышение эффективности использования ресурса агрегатов, а также на снижение материальных и трудовых затрат на обеспечение их работоспособности в процессе эксплуатации.

Изменившаяся структура ремонтной деятельности в новых экономических условиях нашей страны недостаточно эффективна из-за ряда неправильно сложившихся ранее плановых, экономических, организационных и других подходов к обеспечению работоспособности автомобилей и их составных частей. Такая форма организации привела к значительному снижению экономической заинтересованности потребителей в текущем и тем более капитальном ремонте автомобилей и их агрегатов. Вследствие этого автотранспортные предприятия стали отказываться от услуг авторемонтных предприятий, а потребность удовлетворять за счет собственной

производственно-технической базы, ремонтных служб и прочих ресурсов.

Из-за несовершенства организации и отсутствия специализированного оборудования, номенклатура и объем восстанавливаемых изношенных деталей на площадках ремонта весьма ограничены. Передовая практика авторемонтного производства и научные разработки подтверждают, что экономически целесообразно восстанавливать до 40 % деталей, а 30 % деталей необходимо заменять новыми. Фактически, применительно к российским условиям эксплуатации, восстанавливается около 12–15 % деталей, а используется повторно без ремонтных воздействий более 50 % деталей.

За рубежом картина восстановительного и ремонтного производства коренным образом иная. Крупнейшие производители компонентов для автомобильной промышленности, такие как ZF, Bosch, CF, Denso, Wabco и многие другие имеют крупные производства по ремонту узлов и восстановлению деталей. В США 90 % рынка автозапчастей составляют восстановленные детали, в Европе намечается такая же тенденция стремительного роста восстановительного производства наряду со стагнацией рынка новых автозапчастей [1].

В нашей стране у большинства покупателей восстановленная деталь зачастую ассоциируется с бывшей в употреблении и, как следствие, не формирующей спроса. В основном это связано с тем, что по теме ремонта и восстановления у нас имеется очень мало информации, в то время как в США – это целая отрасль промышленности, характери-

зующаяся сформированной структурой, приносящая миллиарды долларов дохода и предоставляющая тысячи рабочих мест.

Таким образом, на сегодняшний день можно обозначить две основные причины формирования и развития ремонта агрегатов и восстановительного производства деталей.

Во-первых, это высокая стоимость новых агрегатов автозапчастей. Восстановлению подлежат в основном сложные автомобильные узлы и агрегаты, такие как стартеры, генераторы, коробки переключения передач, компрессоры кондиционера, топливные насосы, форсунки, приводы, рулевые рейки, насосы гидроусилителя. Стоимость таких узлов зачастую может составлять значительную величину от стоимости всего автомобиля, что делает такой способ восстановления работоспособности высокорентабельным.

Во-вторых, это негативное воздействие на окружающую среду в процессе производства новых узлов и агрегатов. Например, компания Bosch, являющаяся одним из лидеров на рынке восстановления автокомпонентов, на своем официальном сайте заявляет о том, что в 2009 г. на ее производстве было восстановлено 2,5 млн автозапчастей, благодаря чему выбросы CO₂ сократились на 23 000 т по сравнению с выпуском новых деталей [2].

Все эти аспекты говорят о том, что сегодня необходимы поиски путей совершенствования существующей системы ремонта и формулирования принципов их реализации в целях снижения трудоемкости ремонта и увеличения эффективности эксплуатации автомобиля в целом.

В практической эксплуатации коммерческого транспорта попытки прогнозирования возможных эксплуатационных убытков либо вообще не производятся, либо эти затраты пытаются априорно снизить на текущем этапе восстановления работоспособности традиционными способами. Одни из них основаны на экономии материальных, сырьевых и энергетических ресурсов, другие требуют совершенствования кадровой политики ремонтного персонала, что отражается на больших капиталовложениях, требуют высокой квалификации ремонтных рабочих и большого временного лага реализации таких

методов. Поэтому эксплуатация транспорта при такой системе характеризуется значительными простоями в ремонте агрегатов, малым коэффициентом технической готовности автомобилей, большими материальными затратами и затратами на оплату труда. Поэтому существует потребность в привлечении научного инструментария в целях снижения влияния такого рода негативных аспектов в эксплуатации.

По результатам анализа актов постановки подвижного состава на ЦАРМ при МБУСАТ г. Красноярск установлено, что около 65 % автомобилей поступает в ремонт по причине естественного износа поверхностей деталей агрегатов. Порядка 15 % отказов обусловлены разрушениями рабочих поверхностей деталей, 12 % – деформации деталей.

Остальные 8 % подвижного состава поступают в текущий ремонт по причинам внезапных отказов, не зависящих от режима и организации технического обслуживания и ремонта.

Таким образом, из большого числа разрушающих процессов, приводящих к отказу деталей, главное внимание необходимо уделить развитию вероятностных методов оценки ресурса, связанных с износом, поскольку решение этой проблемы позволяет подойти к решению задач по снижению разного рода производственных ресурсов для самих предприятий, производителей техники и ее владельцев.

Решение задач по повышению экономической эффективности невозможно без внедрения новых научных перспективных разработок. Достаточно перспективным возможным направлением решения таких задач является развитие инструментариев в области ремонтных технических воздействий, основанных на анализе размерных характеристик деталей и их взаимном сопряжении. Этому способствовало множество научных трудов авторов СФУ, основанных на обеспечении точности замыкающих звеньев размерных цепей [3].

В настоящее время это направление получило дальнейшее развитие и представлено в новом усовершенствованном подходе в виде методики назначения наиболее эффективного вида и состава ремонтных работ.

Снизить номенклатуру затрат на эксплуатацию агрегата возможно, подобрав оптимальный вид ремонтных воздействий, соответствующих его фактическому техническому состоянию, поскольку разные виды ремонта в разной степени отражаются на суммарных удельных затратах при эксплуатации агрегата.

Основополагающим фактором, влияющим на содержание технических воздействий, является количественная оценка фактического состояния агрегата. Поэтому первичной информацией, необходимой для функционирования методики назначения оптимального состава ремонтных технических воздействий, является величина износа агрегата или показатель фактического технического состояния агрегата в момент принятия решения.

Именно количественная оценка фактического состояния агрегата в целом может служить характеристикой в выборе вида ремонтных технических воздействий. При этом основную роль обобщенного параметра, характеризующего потенциальную работоспособность агрегата, выполняет величина остаточной точности размерных параметров, распределенных по всему агрегату (рис. 1).

В общем случае размерные параметры агрегата являются составляющими общего износа и в период дальнейшего изменения функции изнашивания становятся ее постоянными членами. При проведении ремонтных работ в агрегате отказавшие детали заменяются на новые или восстановленные, которые по мере использования также подвергаются изнашиванию в дальнейший период эксплуатации.

Бесконечно малому приращению времени эксплуатации агрегата – Δt соответствует бесконечно малое приращение суммарного износа – $\Delta \sum R$, поэтому суммарный износ агрегата представляет собой непрерывную функцию от времени:

$$\Delta \sum R = F(t). \quad (1)$$

В то же время износ i -х размерных параметров R_i , входящих в структуру агрегата, также представляет собой непрерывную функцию от времени:

$$\Delta R_i = f_i(t). \quad (2)$$

Суммарный износ агрегата может быть выражен как сумма износов отдельных размерных параметров и описан непрерывной функцией

$$\Delta \sum R = \sum_{i=1}^n \Delta R_i = \sum_{i=1}^n f_i(t) = F(t). \quad (3)$$

Если для всех размерных параметров агрегата найти подобные функции износа, выразить их в единых измерителях, а затем просуммировать их для всех элементов, то в результате может быть получена функция, оценивающая износ всего агрегата.

Учитывая описанные соображения, общую изношенность агрегата предлагается оценивать коэффициентом интегральной остаточной точности Δ_Σ :

$$\Delta_\Sigma = \sum_{i=1}^n \mu_i \left(1 - \frac{R_{ti} - R_{0i}}{R_{pi} - R_{0i}} \right), \quad (4)$$

где n – количество размерных параметров агрегата, которое подлежит измерению в момент оценки изношенности, ед.; μ_i – коэффициент, характеризующий весомость размерного параметра по его средней наработке до

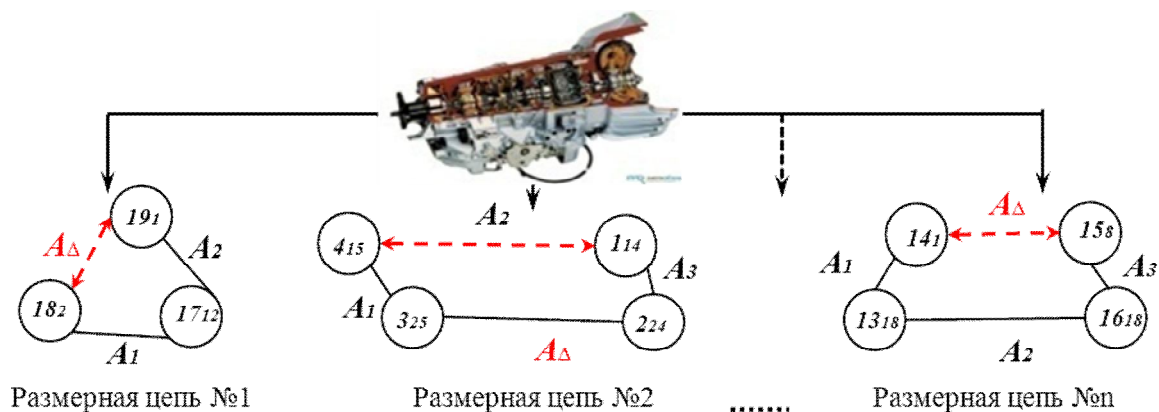


Рис. 1. Графовая структура интегральной размерной модели агрегата

отказа; R_{ti} – текущее (фактическое) значение i -го размерного параметра в момент оценки изношенности агрегата, мм; R_{pi} – предельное значение i -го размерного параметра в момент оценки изношенности агрегата, мм; R_{0i} – значение размерного параметра, соответствующее нижнему отклонению поля допуска i -го размерного параметра в момент оценки изношенности агрегата, мм.

Если предположить, что отказ любого размерного параметра имеет одинаковый вклад в надежность агрегата в целом, то определение интегральной остаточной точности можно было бы произвести как сложение остаточной точности отдельных размерных параметров. Но отдельные размерные параметры агрегата оказываются важнее в силу различных интенсивностей изнашивания, условий нагруженности и других эксплуатационных и конструктивных факторов. Поэтому коэффициент весомости μ предлагается оценивать выражением

$$\mu_i = \frac{\bar{L}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{L}_i}, \quad (5)$$

где $\bar{L}_i$ – среднее значение наработки на ресурсный отказ i -го размерного параметра агрегата, полученное в модельном эксперименте; n – количество размерных параметров агрегата, которое подлежит оценке технического состояния в момент ремонта.

Теоретические предпосылки методики назначения оптимального вида ремонтных воздействий базируются на основных положениях теории старения и восстановления автомобилей, включая как обобщение трудов ряда ведущих ученых в области поддержания работоспособности автомобилей, так и результаты, полученные автором.

При решении поставленной в исследовании задачи за критерий эффективности принят минимум издержек $C_{\min}$ на эксплуатацию агрегата в моделируемый интервал наработки.

Суммарные затраты для агрегата должны состоять из суммы затрат для каждого вида ремонтных воздействий на весь моделируемый интервал. Суммирование осуществляется по порядку производимых ремонтных воздействий (1, 2, 3, ..., n):

$$C_{\text{сумм}} = \sum_{i=1}^n \Delta C_i. \quad (6)$$

В процессе оптимизации видов технических воздействий определяются такие численные значения коэффициента интегральной остаточной точности $\Delta\Sigma$, размерных параметров, использование значений которых в качестве управляющих содержанием ремонтных технических воздействий приводит к минимальным издержкам на эксплуатацию агрегата:

$$C_{\text{сумм}} \xrightarrow{\Delta\Sigma} \sum_{i=1}^n \Delta C_i. \quad (7)$$

Задача оптимизации вида технических воздействий сводится к минимизации целевой функции суммарных удельных затрат на эксплуатацию агрегата за период с начала момента выполнения очередного вида технического воздействия до заданной наработки, в интервале которой рассчитываются затраты. С учетом этого правая часть уравнения (1) запишется в виде:

$$\sum_{i=1}^n \Delta C_i = \frac{M_{S_j} + \sum_{i=1}^n \Delta U_i}{L_{0 \max}} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где ΔC_i – суммарные удельные затраты на ремонт агрегата, р./км; M – стоимость S_j -го состава ремонтных работ, соответствующего выбранному виду технического воздействия; $L_{0 \max}$ – ресурс агрегата, соответствующий интервалу моделирования, в котором определяются численные значения ΔC_i ; ΔU_i – издержки, связанные с устранением внезапных отказов после назначения вида технического воздействия за наработку $L_{0 \max}$.

Расчет суммарных удельных затрат на эксплуатацию производится путем моделирования жизненного цикла агрегата исходя из назначенного состава технического воздействия S_j . Каждый состав технического воздействия характеризуется объемом проводимых ремонтных работ. Здесь рассмотрены два основных состава технических воздействий: S_1 – устранение всех отказов производится посредством текущих ремонтов; S_2 – в моменты отказов агрегата производятся текущие ремонты в комплексе с попутной заменой деталей, лимитирующих ресурс.

Экономическая целесообразность текущего ремонта с попутной заменой деталей (вид S_2) складывается из нескольких составляющих.

С одной стороны, чем больше количество единовременно заменяемых деталей, тем меньше средние удельные затраты на эксплуатацию. Это происходит за счет снижения трудовых и временных ресурсов на разборочно-сборочные операции, экономии от простоев автомобиля и прочих причин. С другой стороны, применение такого вида воздействия неизбежно связано с негативным явлением, связанным с величиной недоиспользования ресурса заменяемых деталей.

Наличие такого противоречия сводится к постановке задачи оптимизации технико-экономических показателей.

Если выразить изменение затрат, связанных с недоиспользованием ресурса заменяемых деталей через функцию $C_R = f(R)$, изменение суммарных затрат, связанных с экономией трудоемкости на замену деталей через функцию $C_T = f(T)$, и выразить их в единой системе измерения, то решение оптимизационной задачи по технико-экономическому критерию сводится к определению суммарных средних удельных затрат $\sum C_M$:

$$\sum C_M = C_R + C_T \quad (9)$$

или нахождению результирующей функции:

$$f(C_R, C_T) = f(R) + f(T). \quad (10)$$

Исследование осложняется тем, что, во-первых, суммарные затраты $\sum C_R$, связанные с недоиспользованием ресурса заменяемых деталей, зависят от двух переменных: величины остаточного ресурса – L_{lim} заменяемой детали, а также количества единовременных замен деталей – N_Z . Во-вторых, суммарная экономия затрат $\sum C_T$, связанная с попутной заменой деталей, зависит также от двух составляющих: разности величины трудоемкости проведения ремонта по виду S_1 (текущего ремонта) и ремонта по виду S_2 (путных замен) – ΔT , а также разности количества таких ремонтов – ΔN_R .

Таким образом, $\sum C_R$ и $\sum C_T$ есть функции двух переменных:

$$\sum C_R = f(L_{\text{lim}}, N_Z). \quad (11)$$

$$\sum C_T = f(\Delta T, \Delta N_R). \quad (12)$$

Учитывая описанные соображения, уравнение (4) будет иметь вид:

$$f(C_R, C_T) = f(L_{\text{lim}}, N_Z) + f(\Delta T, \Delta N_R). \quad (13)$$

Таким образом, решение поставленной задачи сводится к нахождению минимума функции:

$$f(C_R, C_T) \rightarrow \min. \quad (14)$$

В результате разработанных теоретических положений и собранных экспериментальных данных произведено моделирование оптимальных видов технических воздействий с целью повышения эффективности использования ресурса во время эксплуатации агрегата, что благоприятно отображается на планировании, организации и управлении ремонтного производства.

Имеющаяся информация вводилась в имитационную математическую модель, а затем определялись такие показатели, как: средняя наработка на отказ деталей агрегатов; интервал наработки, при котором фиксируется этот отказ; удельные затраты на ремонт $C_{\text{уд}}$, р./км, в зависимости от коэффициента интегральной остаточной точности по видам технических воздействий.

Одним из основных показателей эффективности ремонта являются удельные затраты на дальнейшую эксплуатацию агрегата. Большой интерес представляет изменение этого показателя в зависимости от фактического технического состояния или изношенности агрегата. В этой связи были смоделированы значения средних удельных затрат на эксплуатацию в зависимости от коэффициента интегральной остаточной точности Δ_Σ и стоимости нормочаса работ (рис. 2). Здесь можно проследить тенденцию снижения средних удельных затрат при увеличении коэффициента интегральной остаточной точности и снижении стоимости нормочаса. Полученные показатели можно использовать для планирования затрат на эксплуатацию агрегатов автомобилей, при анализе хозяйственной деятельности предприятия и условий эксплуатации автомобилей.

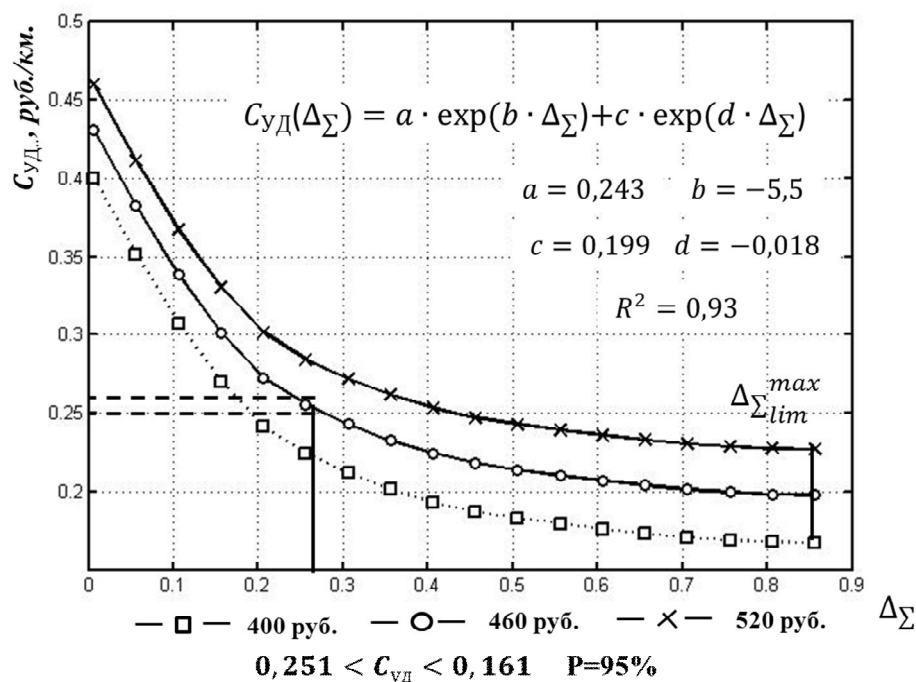


Рис. 2. Изменение средних удельных затрат на эксплуатацию агрегата в зависимости от интегральной остаточной точности его размерных параметров

Так, например, на одну коробку передач при интегральной остаточной точности $\Delta_{\Sigma} = 0,3$ удельные затраты на ремонт составят 0,151 р./км. При этом доверительный интервал изменения удельных затрат при таком значении Δ_{Σ} будет иметь величину $0,145 < C_{уд} < 0,158$ при уровне доверительной вероятности 95 %. Полученная зависимость близка по своей форме к экспоненциальной зависимости. Такая особенность объясняется структурой имитационной модели расчета показателя, поскольку первичной информацией, служащей основой в имитационной модели, являются характеристики изнашивания поверхностей деталей, описываемые экспоненциальной двухпараметрической функцией.

Более детальную структуру процесса формирования затрат можно проследить, если рассмотреть частные случаи формирования затрат на эксплуатацию агрегата по видам технических воздействий. Например, затраты на эксплуатацию при стратегии текущего ремонта формируются за счет следующей структуры отказов (рис. 3).

При постановке эксперимента интервал моделирования составлял 175 тыс. км. Проведенный вычислительный эксперимент позволил установить, что первые затраты форми-

руют отказы таких деталей, как подшипники, элементы синхронизаторов и более дорогостоящих – шестерней, муфт и валов.

Далее был рассмотрен процесс формирования затрат при стратегии попутных замен деталей. Основной входной информацией для реализации расчетов послужили следующие данные: стоимость традиционного текущего ремонта; стоимость запасных частей и материалов, необходимых для ремонта; прогнозируемые ресурсные отказы других деталей. В качестве допущений было спрогнозировано 13 последующих ресурсных отказов, ожидаемых после выполненного текущего ремонта на пробеге 54 тыс. км. Значение пробега, соответствующего первому текущему ремонту, было также смоделировано при заданных номинальных и предельных размерах.

Затраты по S_2 (попутная замена деталей) отображаются кривой 2 (рис. 4), кривая 1 соответствует S_1 – ремонту по потребности. Как показали результаты эксперимента, стратегия попутных замен обеспечивает экономию затрат до 30 %, при этом количество прогнозируемых отказов уменьшается с 14 до 8 при заданном интервале моделирования, равном 175 тыс. км.

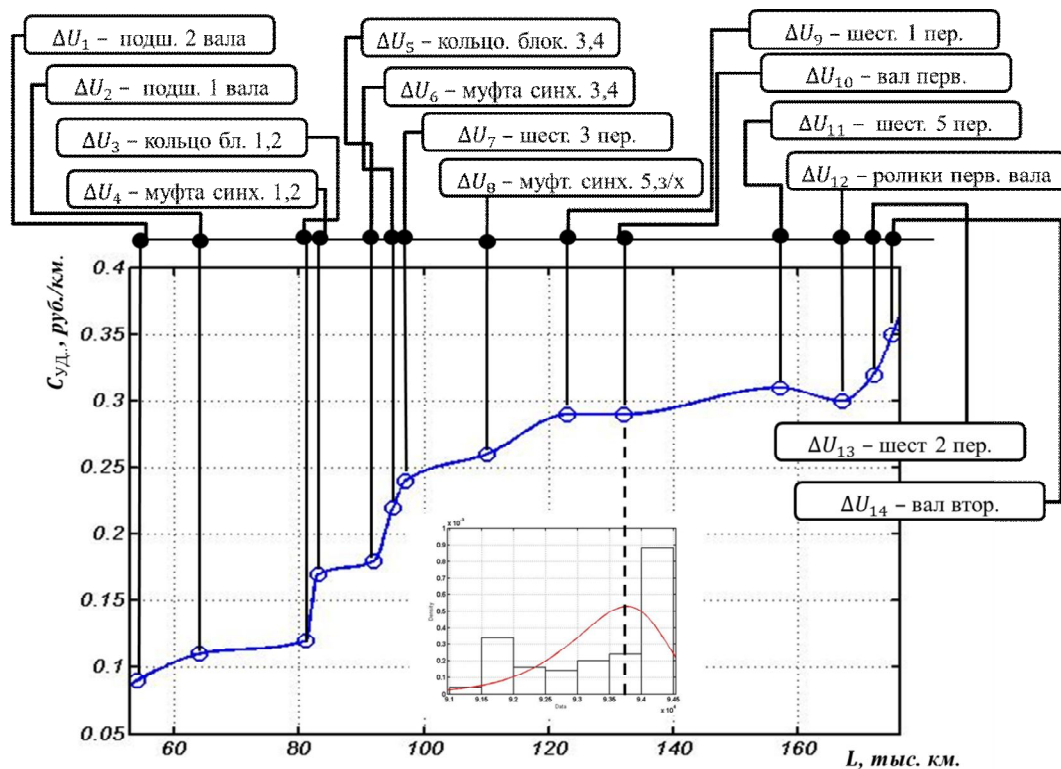


Рис. 3. Структура отказов коробки переключения передач и соответствующие затраты на эксплуатацию

При помощи разработанной модели поддержки принятия решений можно исследовать изменение средних удельных затрат на эксплуатацию при изменении различных входных характеристик. Например, стоимости ремонтных операций, стоимости запас-

ных частей, трудоемкости технических воздействий, убытков, связанных с недоиспользованием ресурса заменяемых деталей. Данная информация может быть полезной при принятии различных решений при управлении и планировании ремонтного производ-

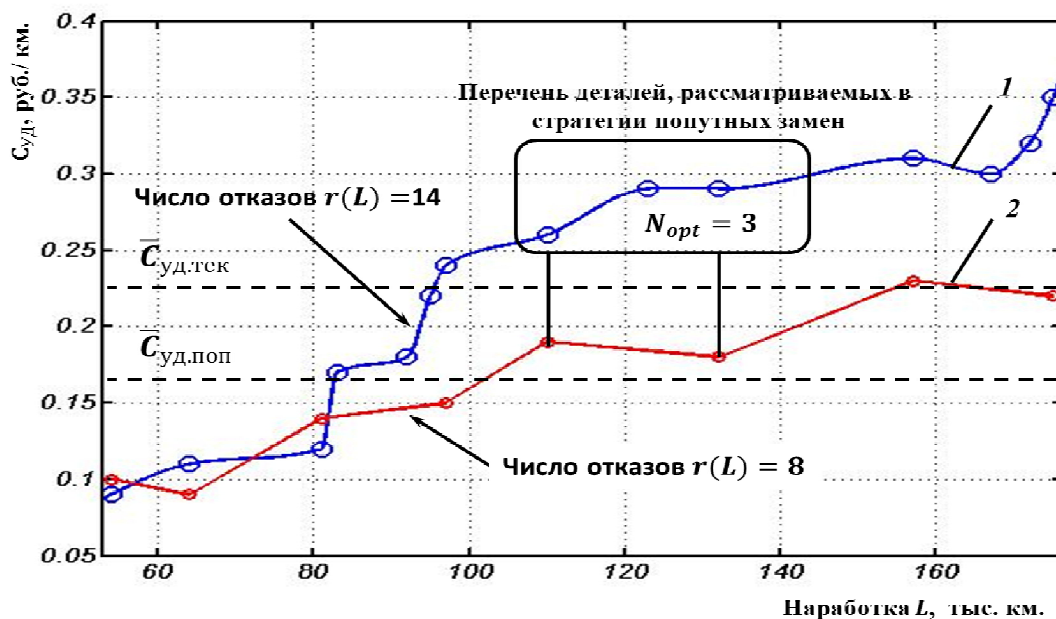


Рис. 4. Процесс формирования удельных затрат на эксплуатацию при стратегии попутных замен

ва, например, при изменении трудоемкости и стоимости нормочаса работ.

Для решения данной задачи был поставлен вычислительный эксперимент. В нем рассчитывались средние удельные затраты на эксплуатацию агрегата $C_{уд}$ по видам ремонтных воздействий в зависимости от коэффициента интегральной остаточной точности размерных параметров агрегата.

Модельными расчетами определены три основных зоны значения этого коэффициента (рис. 5), где целесообразен тот или иной вид работ. Например, если значение этого коэффициента лежит в пределах δ_1 : $0 \leq \Delta_\Sigma \leq 0,18$, то целесообразно списание агрегата и установка нового. Диапазон δ_2 : $0,18 < \Delta_\Sigma \leq 0,73$ — соответствует целесообразности попутных замен деталей. Диапазон δ_3 : $0,73 < \Delta_\Sigma \leq 0,85$ — зона, где эффективен текущий ремонт.

Таким образом, представлены численные значения критерия разграничения, определяющего целесообразность того или иного вида технических воздействий на основе интегральной оценки точности размерных параметров, распределенных по всему агрегату. Другими словами, получены количественные характеристики для принятия решения о виде ремонтных технических воздействий на примере коробки переключения передач.

На основе ранее предложенных теоретических положений была описана разработанная методика определения технических

воздействий оптимального состава. Интегрирование в разработанную методику информации о износах размерных параметров деталей на величину наработки, а также структурной составляющей дает возможность научно обоснованно подходить и к решению ряда научно-прикладных и производственных задач: назначение вида ремонтных технических воздействий оптимального состава, соответствующих фактическому техническому состоянию агрегата автомобиля; выдвижение взвешенных и рациональных подходов к обоснованию сроков гарантийного пробега, дифференцированных по техническому состоянию агрегатов; прогнозирование производственных издержек и планирование производственной деятельности предприятий; достоверная оценка допустимых без ремонта размерных параметров деталей; повышение качества проведения ремонтных воздействий за счет повышения послеремонтного ресурса узлов и агрегатов; разработка актуализированных математических моделей назначения видов и стратегий технических воздействий, основанных на анализе фактического технического состояния объекта ремонта.

Указанные задачи могут быть дополнены, расширены и адаптированы в зависимости от особенностей организации производственного процесса конкретного предприятия, производящего различные виды восстанови-

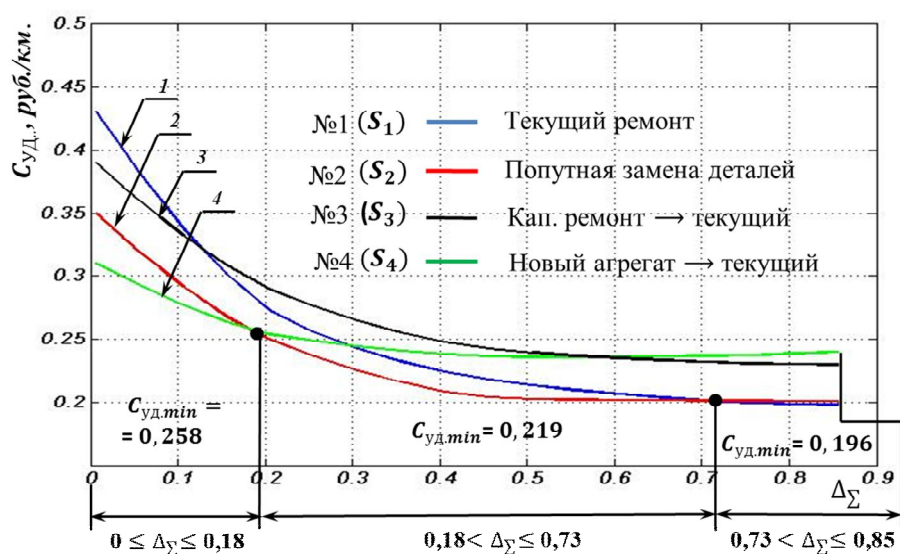


Рис. 5. Изменение средних удельных затрат на эксплуатацию агрегата по видам ремонтных воздействий

тельного ремонта агрегатов и узлов автомобильного транспорта.

Решение указанных задач позволит на новом качественном уровне обеспечить необходимым информационным сопровождением руководство и инженерные службы предприятий по эксплуатации и ремонту.

Полученные результаты модельного эксперимента также подтверждают вывод о том, что именно обоснованность видов ремонт-

ных воздействий имеет решающее значение в повышении эффективности ремонта агрегатов автомобилей.

Таким образом, рабочая гипотеза о возможности повышения эффективности использования ресурса за счет обоснования вида ремонтных воздействий полностью подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями и полученными численными модельными показателями.

Библиографический список

1. Воронова Е. Гарантия качества // Правильный автосервис. 2012. № 3. С. 22–24.
2. Протасов Н. «Детальная» экономия. Восстановление базовых деталей – актуальная проблема автотремонта // Основные средства. 2011. № 8.
3. Катаргин В.Н., Камольцева А.В., Хмельницкий С.В. Интегральные размерные модели как основа процессов ремонта агрегатов АТС // Автомобильная промышленность. 2014. № 8. С. 23–26.

Katargin V.N., Khmelitskiy S.V. The Selection of a Method of Repairs the Units of Vehicles on the Basis of Integral Modeling of their Residual Resource Utilization. The peculiarities of the process of repairs the units of vehicles in Russia and abroad are analyzed. The paper suggests the results of the research, aimed at the development of an alternative method of identifying the optimal type of repairs, in terms of increasing the resource utilization efficiency, and decreasing the operation costs. The specification of the repairs process on the basis of an integral assessment of the residual accuracy of the units' dimensional characteristics is described.

Key words: *cost per unit; unit; repairs; car parts obsolescence; reliability indicators; modeling.*

Катаргин Владимир Николаевич – кандидат технических наук, профессор кафедры «Транспорт» Сибирского федерального университета. E-mail: katargin@gmail.com

Хмельницкий Сергей Владимирович – ассистент кафедры «Транспорт» Сибирского федерального университета. E-mail: hmel.sv@gmail.com