

ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ОСЖД)

II издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 8-10 сентября 2009 г.,
г. Яремче, Ивано-Франковской области (Украина)

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 20-23 октября
2009 г., Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 23 октября 2009 г.

Примечание. Теряет силу I издание 28.10.1987 г.

**Р
647/3**

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ПРИМЕНЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ДИЗЕЛЬНОГО
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

Принципы построения автоматической системы планово-предупредительных ремонтов (АС ППР)

Информационное обеспечение АС ППР

Методика оптимизации периодичности и объемов ремонтных работ

Определение периодичности ремонтов по критерию минимального расхода топлива

Регулирование периодичности и объемов ремонтов в АС ППР

Управление техническим состоянием ТПС в АС ППР

Введение

Постоянное изыскание резервов увеличения межремонтных пробегов и сокращения объемов работ по осмотру и восстановлению главные направления совершенствования системы технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава. В большинстве развитых стран эта важная проблема решается опытно-теоретическим путем. Опыт эксплуатации локомотивов, имеющих увеличенные пробеги между ремонтами, сочетается с результатами теоретических обобщений, сделанных при исследовании надежности лимитирующих агрегатов и узлов.

До последнего времени ввиду значительной сложности объекта исследования, а также действия большого числа возмущающих факторов, значительная часть которых носит случайный характер, совершенствование системы планово-предупредительных ремонтов осуществляли путем обобщения опыта эксплуатации локомотивов, проведения специально организованных экспериментов, опираясь на интуицию инженеров-практиков.

Однако при таком подходе невозможно учесть все многообразие определяющих техническое состояние оборудования факторов, многие из которых носят случайный характер, по-разному проявляясь в конкретных условиях эксплуатации при различных климатических и нагрузочных режимах. Вследствие этого ресурс одноименных элементов, величиной которого ограничены межремонтные пробеги, значительно различается у локомотивов, приписанных к разным депо. Несмотря на это действующими правилами установлены практически одинаковые межремонтные пробеги у всех локомотивов одной серии, независимо от их прописки. Допускаемые 10%-е отклонения от установленных норм не могут адекватно отразить все многообразие конкретных условий эксплуатации. Поэтому возникают такие ситуации, когда в одних депо локомотивы ставятся на плановый ремонт с ощутимым запасом по ресурсу некоторых агрегатов, а в других ресурс тех же самых агрегатов оказывается исчерпанным задолго до наступления плановых сроков постановки локомотива на ремонт, что сопровождается увеличением числа неплановых ремонтов.

Все это свидетельствует о том, что существующие методы определения периодичности и объемов планово-предупредительных ремонтов нуждаются в дальнейшем совершенствовании в направлении более тщательного учета фактического технического состояния оборудования локомотивов. В задачу технического обслуживания и ремонта локомотивов должно входить не только восстановление отказавших узлов и агрегатов, но и максимальное предотвращение отказов. Только при этом условии система ремонта станет не только плановой, но и по-настоящему предупредительной.

Для решения современных задач требуется создать такую теоретическую базу, которая давала бы возможность с единых методологических позиций решать вопросы совершенствования системы технического обслуживания и ремонта, т. е. обоснованно выбирать периодичность и объемы плановых ремонтов локомотивов любых серий применительно к конкретным условиям их эксплуатации. Даже в пределах одного участка обращения условия работы локомотивов различаются: различны скорости движения, массы поездов, состояние пути и т. д. Нарботка деталей до предельного состояния является в этих условиях случайной величиной. Поэтому определение сроков ремонта деталей и узлов локомотива должно базироваться на методах теории вероятностей и математической статистики, позволяющих построить математическую модель процесса их отказов, износа или старения, определить числовые характеристики распределения ресурса деталей и узлов и, учитывая технические и экономические факторы, установить срок плановой их замены или ремонта.

1. Принципы построения автоматической системы планово-предупредительных ремонтов (АС ППР)

Различают два основных варианта системы:

- по наработке, когда локомотив изымается из эксплуатации при достижении определенной наработки, заданной заранее и не зависящей от технического состояния его оборудования;
- по состоянию, когда локомотив ставят в ремонт только в случае отказа какого-либо устройства или если его состояние близко к отказу.

Каждый из этих вариантов имеет как преимущества, так и недостатки, и различаются они той ролью, которую играет техническое диагностирование в системе технического обслуживания и ремонта.

Преимуществом обслуживания по наработке является то, что оно позволяет объединять ремонтные операции различного оборудования и таким образом снижать продолжительность простоя локомотива в ремонтах; осуществлять долговременное планирование программы и объема ремонтов различного вида; планировать поставку необходимых запасных частей и материалов, осуществлять равномерную загрузку ремонтных цехов, планировать численность ремонтного персонала и фонда заработной платы и т. д. Недостаток обслуживания по наработке заключается в том, что в процессе выполнения планового ремонта (ПР) или технического обслуживания (ТО) осуществляется демонтаж назначенного к ремонту оборудования независимо от его технического состояния. Вмешательство же в работу нормально функционирующего оборудования может не только не улучшить, но и ухудшить его техническое состояние, так как возникнут приработочные отказы. Это в свою очередь приведет к необходимости проведения дополнительных неплановых ремонтов, увеличению простоя локомотива в ремонтах. Роль

технической диагностики в системе ремонта по наработке сведена к минимуму. Простейшие контрольно-измерительные приборы и устройства используются, в основном, при проведении предремонтных и послеремонтных испытаний.

При техническом обслуживании и ремонте по состоянию объем и периодичность ремонтных операций определяются фактическим техническим состоянием оборудования, которое постоянно или периодически контролируется с помощью средств технического диагностирования. Операции по замене, регулировке и восстановлению в этом случае назначают при обнаружении неработоспособного оборудования или его предотказного состояния.

Такое проведение ремонта позволяет уменьшить число конкомитантных отказов - отказов, вносимых в процессе технического обслуживания и ремонта, регулировки, демонтажа и монтажа оборудования на локомотиве. Оказывается возможным экономить запасные части, так как уменьшаются необоснованные замены узлов и деталей, повышается степень использования машины по назначению.

Иногда высказывается мнение, что развитие средств технического диагностирования и их широкое применение в локомотивном хозяйстве позволит целиком перейти от планово-предупредительной системы технического обслуживания и ремонта локомотивов к ремонту по потребности или по техническому состоянию. Однако это применимо только к сравнительно простым техническим устройствам, отдельные элементы которых можно восстанавливать независимо от других.

Для восстановления большей части агрегатов, узлов локомотивов, особенно механического оборудования, необходимы постановка локомотива в депо с изъятием его из эксплуатации и проведение трудоёмких монтажно-демонтажных работ, осуществление которых при ремонте каждого узла в отдельности привело бы к значительному увеличению времени нахождения локомотива в ремонтах и повышению их стоимости. Поэтому при постановке локомотива в ремонт из-за отказа какого-либо устройства или исчерпания его ресурса целесообразно восстанавливать не только это устройство, но и другие узлы и агрегаты, ресурс которых еще не исчерпан, но приближается к предельному значению. Такая система проведения ремонтов является планово-предупредительной, но одновременно учитывает фактическое состояние оборудования локомотивов.

Предотвращение отказов ТПС в системе технического обслуживания и ремонта осуществляется наиболее эффективно в том случае, когда удастся выявить потерю работоспособности оборудования на самых ранних стадиях развития этого процесса. Достижению этой цели служит система технического диагностирования, которая является неотъемлемой составной частью системы технического обслуживания и ремонта локомотивов, учитывающей их фактическое состояние.

Выполнение технического обслуживания и ремонта локомотивов с учетом их фактического состояния (ПР УТС) должно быть основано на исчерпывающей и достоверной информации о техническом состоянии оборудования каждого локомотива. Наиболее эффективным способом получения такой информации является техническое диагностирование с использованием информационных измерительных систем, микропроцессорной техники, персональных ЭВМ и автоматизированных рабочих мест, поэтому такую систему технического обслуживания и ремонта вполне обоснованно можно считать автоматизированной системой планово-предупредительных ремонтов (АС ППР) локомотивов.

2. Информационное обеспечение АС ППР

Информация, получаемая в результате диагностирования, должна систематизироваться и накапливаться на носителях ЭВМ в упорядоченном виде - в виде специальных форм, позволяющих вести автоматизированный анализ накопленной информации.

С точки зрения характера информации о техническом состоянии объекта различают два способа диагностирования:

- определение состояния по бинарному параметру;
- диагностирование контролируемого параметра.

В первом способе диагностирования по его результатам получают сведения о том, работоспособен проверяемый объект или нет, т. е. удовлетворяет он всем предъявляемым требованиям или же некоторые из них (пусть даже только одно) нарушены. Таким образом, при первом способе диагностирования производится по схеме "да - нет", "исправен - неисправен".

При оценке состояния электрических цепей используются два бинарных параметра "наличие-отсутствие цепи", "наличие-отсутствие сигнала". На основе параметра "наличие-отсутствие трещин" оценивают техническое состояние подверженных механическому разрушению деталей локомотивов с помощью дефектоскопии. Поверхностные трещины у ответственных деталей из стали и других ферромагнитных материалов обнаруживают с помощью магнитной дефектоскопии. Трещины и дефекты не выходящие, на поверхность деталей, обнаруживают с помощью ультразвуковой дефектоскопии, действие которой основано на способности ультразвуковых волн проходить сквозь детали и отражаться от их внутренних дефектов. Для целей диагностики могут использоваться также голография, инфракрасная и люминесцентная дефектоскопия. Широко используют также спектральный анализ смазок, на основании которого можно определить такие неисправности, как излом деталей зубчатой передачи, разрушения сепараторов подшипников, выплавления вкладышей подшипников, увеличенные радиальные зазоры "на масло" и т. п. Событие, заключающееся в потере работоспособности, означает отказ объекта. Информация о всех отказах, т.е. случаях, когда в результате

диагностирования установлен факт потери работоспособности объекта, накапливается в специальных формах, содержащих необходимые сведения и позволяющих производить их автоматизированную обработку на ЭВМ. Совокупность сведений, содержащихся в учетных формах об отказах, хранящаяся в памяти ЭВМ или в других накопителях, образует банк данных об отказах.

Во втором способе диагностирования информация о техническом состоянии объекта получается в виде численных значений контролируемых параметров, характеризующих изменение состояния объекта по мере увеличения его наработки. Так изменение сопротивления постоянному току позволяет оценить состояние контактов, проводов, изоляции, резисторов, полупроводников, приборов, обмоток электрических машин. Моменты срабатывания и возвращения в исходное состояние аппаратов определяют по значению постоянного тока и скорости его изменения во времени.

Оценка состояния и работоспособности источников питания, устройств защиты, полупроводниковых приборов осуществляется по мгновенному и амплитудному значению напряжения, скорости его изменения. По времени можно оценить реакцию аппаратов на рабочее воздействие. Фазовые сдвиги, длительность импульса, периодичность следования импульсов, частота и скорость затухания колебаний могут служить контролируемыми параметрами при оценке реактивных сопротивлений, состояния гасителей механических колебаний. На основании оценки линейных и угловых перемещений можно оценить относительное расположение деталей и узлов в пространстве, их скорость и ускорение при функционировании. По значениям силы, давления, скорости изменения этих физических величин можно судить о тяговых свойствах локомотива, состоянии тормозов, пневматических и гидравлических систем и т. п. Большую информацию о состоянии подвижных частей машин и механизмов дает анализ шума, издаваемого ими в процессе функционирования. При возникновении самых различных неисправностей - изломов, трещин, повышенных износов, несоосностей, дисбаланса и др. - меняется не только амплитуда акустического сигнала (уровень громкости), но и его спектральный состав. В современной технической диагностике возникло самостоятельное направление - виброакустическая диагностика, которая разрабатывает методы оценки состояния технических устройств по результатам анализа вибрационных и акустических сигналов, позволяющие не только зафиксировать сам факт наличия или отсутствия дефекта, но и установить место возникновения неисправности, ее характер и т. д.

Информационно-емким параметром является температура нагрева устройств самого различного назначения. С помощью этого параметра оценивают состояние механического оборудования (узлов трения подшипников), обмоток электрических машин и аппаратов, контактных элементов, радиоэлектронных деталей, систем охлаждения и обогрева и

т. п. Геометрические размеры можно использовать для оценки состояния прежде всего узлов и деталей локомотива, подверженных износу.

Значения контролируемого параметра оборудования локомотивов изменяются в процессе эксплуатации. За техническим состоянием оборудования, как правило, не удастся наблюдать непрерывно, а информацию о значениях контролируемых параметров получают на одном из очередных ремонтов или осмотров. Если измерение значений контролируемого параметра и наработки соответствующего узла вести от момента полного его восстановления, когда контролируемый параметр был номинальным, то ряд его значений, полученных при нескольких последовательных измерениях, будет представлять реализацию контролируемого параметра. Информация при втором способе диагностирования накапливается в специальных формах учета контролируемых параметров, которые должны давать возможность построения реализаций контролируемых параметров, т. е. наработка на момент изменения параметра должна отсчитываться от момента, когда значение параметра было достаточно близким к номинальному. Все сведения об изменении контролируемых параметров при увеличении наработки, хранящиеся в памяти ЭВМ или в других накопителях, образуют банк данных о контролируемых параметрах (износах).

3. Методика оптимизации периодичности и объемов ремонтных работ

Накопленная в банке данных (БД) об отказах информация, систематизированная по видам оборудования и причинам нарушения работоспособности, позволяет рассчитать основной показатель безотказности ремонтируемых изделий - параметр потока отказов:

$$\omega_i = \frac{\Delta n_i}{N \Delta l}, \quad (1)$$

где:

Δn_i - число отказов рассматриваемых объектов в i -м интервале наработки;

Δl - величина интервала наработки.

Результаты расчёта параметра потока отказов для различных интервалов $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_k$ определяют зависимость этого показателя от наработки, т. е. $\omega(l)$, имея которую, можно определить оптимальный пробег до планового ремонта рассматриваемого объекта.

Оптимизацию системы ремонта локомотивов целесообразно осуществлять по критерию, который бы включал в себя все виды затрат на выполнение технического обслуживания и ремонта, приходящиеся на объем работы, выполненной локомотивами. Так как решение задачи оптимизации системы ремонта осуществляется для конкретных условий

эксплуатации, все соответствующие значения показателей, входящих в критерий оптимальности, следует определять с учетом этих условий. Тогда наибольшую эффективность работы локомотивов можно получить, если при определении оптимальной системы ремонта в качестве критерия оптимальности использовать отношение суммарных затрат на выполнение ремонтов локомотивов в течение определенного периода к объёму работы, измеряемой в тонно-километрах брутто, произведенной в течение того же периода.

Известно, что в конкретных условиях эксплуатации локомотивов одной серии фактором, определяющим выполненную работу, может быть любой из эксплуатационных показателей, а именно - наработка, измеренная в единицах календарного времени или в тысячах километров пробега, расход электроэнергии или дизельного топлива на тягу поездов или произведенная работа в тонно-километрах, так как все они связаны между собой линейными зависимостями. Исходя из того, что в нашей стране в качестве основного измерителя наработки принят линейный пробег, его целесообразно использовать как показатель выполненной работы. Следовательно, критерий оптимальности целесообразно выразить в виде отношения суммарных затрат на выполнение ремонтов локомотивов за определенный период наработки к продолжительности этого периода.

Оптимальной будет считаться система ремонта локомотивов с параметрами обеспечивающими в эксплуатации наименьшие приведенные к единице их наработки затраты - суммарные удельные затраты на выполнение плановых и неплановых ремонтов:

$$g(L) = \frac{1}{L} \left\{ C_n \int_0^L \omega(l) dl + C_{\text{П}} \right\}, \quad (2)$$

где:

C_n - средняя стоимость одного непланового ремонта;

$C_{\text{П}}$ - средняя стоимость одного планового ремонта;

L - межремонтный пробег.

Затраты на плановый ремонт включают в себя затраты на материалы или запчасти C_1 на оплату труда C_2 и потери от простоя локомотива C_3 - т.е.

$$C_n = C_1 + C_2 + C_3,$$

Затраты на неплановый ремонт, помимо указанных величин включают также потери C_4 , вызванные отказом локомотива и пути следования (например, вследствие нарушения графика движения поездов порчи грузов, подвижного состава и др., т.е.

$$C_n = C_1 + C_2 + C_3 + C_4,$$

Таким образом, $C_H \geq C_P$, причем $C_H = C_P$ только для таких элементов, отказы которых не вызывают задержек локомотива в пути следования.

До сих пор нет точной оценки стоимости задержки поезда на перегоне либо если она есть, то не в полной мере отражает ущерб от отказа. Поэтому, хотя в локомотивных депо и имеется информация о времени задержек локомотивов на перегонах после отказа, не представляется возможным достоверно оценить составляющую C_4 затрат на неплановые ремонты оборудования локомотивов, вследствие чего невозможно рассчитать абсолютное значение средних суммарных затрат. Однако, используя относительные значения C_H и C_P , можно определить пробег между плановыми ремонтами L_0 , которому соответствует минимальное значение средних суммарных удельных затрат $q(L_0)$, т. е. оптимальный межремонтный пробег.

Отношение затрат па плановые и неплановые ремонты:

$$K = C_H / C_P, \quad (3)$$

Так как $C_H \geq C_P$, то $K \geq 1$. Выразив C_H через K и C_P подставив его в формулу (3) получим:

$$g(L) = C_P \left(K \int_0^i \omega(1) dl + 1 \right) / L, \quad (4)$$

По физическому смыслу величина, стоящая в числителе дроби (4), это суммарные затраты на неплановые и плановые ремонты, поэтому выражение в скобках представляет собой суммарное приведенное число ремонтов, т. е. величина $K \int_0^i \omega(1) dl$ приводит суммарное число неплановых ремонтов к эквивалентному по стоимости числу плановых ремонтов,

Отношение:

$$S(l) = \left(K \int_0^i \omega(1) dl + 1 \right) / L, \quad (5)$$

назовем суммарным удельным приведенным к единице наработки числом ремонтов.

Поскольку функции $q(l)$ и $S(l)$ принимают минимальные значения при одной и той же наработке L_0 , становится возможным, используя критерий оптимальности (5), рассчитать оптимальный межремонтный пробег L_0 при различных фиксированных значениях коэффициента K .

Информация об изменении контролируемых параметров, накапливаемая в банке данных, достаточна для определения функции плотности распределения ресурса $f(1)$ рассматриваемого объекта. Переход

от функции $f(l)$ к параметру потока отказов $f(1)$ осуществляется решением интегрального уравнения.

$$\omega(l) = f(l) + \int_0^l \omega(s)f(l-s)ds, \quad (6)$$

где S - текущая переменная.

После определения $\omega(l)$ минимизацией целевой функции (5) находятся оптимальные межремонтные пробеги тех деталей и узлов, для которых по результатам диагностики формируется информационный БД об изменении контролируемых параметров.

Таким образом, независимо от того в какой форме накапливается информация о результатах диагностирования оборудования локомотивов в виде БД об отказах или об изменении контролируемых параметров - обработка полученной информации даёт ряд функциональных зависимостей суммарных удельных затрат на проведение плановых и неплановых ремонтов:

$$g(L_1), g_2(L_2), \dots, g_N(L_N), \quad (7)$$

и соответствующий им ряд оптимальных межремонтных пробегов:

$$L_{10}L_{20} \dots, L_{N0}, \quad (8)$$

где N - число диагностируемых объектов разного типа.

При построении системы ремонта большое значение имеет принцип формирования структуры ремонтного цикла, определяющий схему и чередование ремонтов различного объема. Анализируя все известные системы технического обслуживания и ремонта, можно сделать вывод, что, несмотря на существенные различия, они имеют общее свойство - кратность межремонтных наработок, в соответствии с которой наработка до ремонта большего объема в целое число раз превышает наработку до ремонта меньшего объема; кроме того, все операции, выполняемые в процессе какого-либо ремонта, входят в объем более крупного ремонта.

Осуществив группировку межремонтных пробегов различных узлов и деталей в соответствии с принципом кратности, получают оптимальную систему технического обслуживания и ремонта локомотивов, в которой сведены к минимуму суммарные удельные затраты на плановые и неплановые ремонты всех элементов оборудования, контролируемых системой технической диагностики.

Критерием оптимальности системы ремонта локомотивов является минимум целевой функции:

$$g(L_1, L_2, \dots, L_N) = \sum_{i=1}^N g_i(L_i), \quad (9)$$

при соблюдении кратности межремонтных пробегов отдельных узлов:

$$\begin{aligned} L_2 &= a_2 L_1; \\ L_3 &= a_3 a_2 L_1; \\ L_N &= a_N L_{N-1} = a_N a_{N-1} \dots a_3 a_2 L_1. \end{aligned} \quad (10)$$

где a_2, a_3, \dots, a_N - коэффициенты кратности межремонтных пробегов - числа натурального ряда 1, 2, 3, ...

L_1, L_2, \dots, L_N - межремонтные пробеги отдельных узлов и легален, упорядоченные по мере возрастания членов ряда (8).

Определение набора межремонтных пробегов L_1, L_2, \dots, L_N который обращает в минимум целевую функцию (9) при соблюдении ограничений (10), осуществляется методом динамического программирования. Выполнив расчеты, получают оптимальную структуру ремонтного цикла, в котором однозначно определены количество и порядок чередования ремонтов различного объема, перечень работ, выполняемых при ремонте каждого вида по восстановлению работоспособности отдельных узлов и деталей (объем ремонта), пробеги между ремонтами различного объема. Важно отметить, что все эти параметры находятся по результатам диагностирования локомотивов, т. е. отражают конкретные условия их эксплуатации и фактическое техническое состояние.

4. Определение периодичности ремонтов по критерию минимального расхода топлива.

В процессе эксплуатации из-за изнашивания и разрегулирования отдельных частей топливной аппаратуры и оборудования дизель-генераторной установки (ДГУ) происходит увеличение удельного расхода дизельного топлива.

Обозначим дополнительный удельный расход (перерасход) дизельного топлива γ . Зависимость γ от наработки описывается функцией $\gamma(l)$.

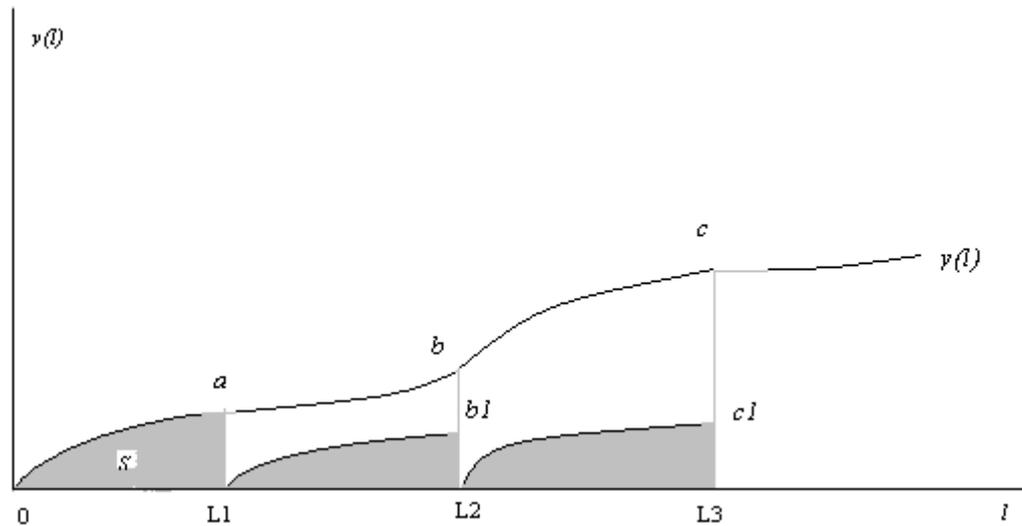


Рис. 1

С определенной периодичностью (на рис.1 при наработках L_1, L_2, L_3, \dots) производится ремонт и регулировка оборудования ДГУ, которые восстанавливают свои первоначальные свойства.

Площадь фигуры $0abcL_3$ - количество перерасходованного топлива при отсутствии ремонта и регулирования.

Суммарная площадь фигур $0aL_1, L_1bL_2, L_2cL_3$ - количество перерасходованного топлива при наличии ремонта и регулировок.

Площадь фигуры L_1abcL_3 - количество топлива, сэкономленного за счет ремонта и регулировок.

Очевидно, что площадь фигуры $0aL_1$:

$$S = \int_0^{L_1} \gamma(l) dl,$$

При стоимости единицы массы топлива C_T дополнительные затраты, вызванные перерасходом топлива в интервале между ремонтами и регулировками будут:

$$\Delta C_T = C_T \int_0^{L_1} \gamma(l) bl$$

Если при наработке L производится ремонт и регулировка, а стоимость каждой составляющей C_p , то суммарные удельные затраты, обусловленные перерасходом топлива и ремонтом и регулировкой ДГУ, будут:

$$g(L) = 1/L \left(C_T \int_0^L \gamma(l) bl + C_p \right), \quad (11)$$

Следовательно значение наработки L_0 , при котором обеспечивается минимальное значение функции $q(L)$, является оптимальной периодичностью ремонта и регулировки ДГУ.

В качестве примера рассмотрим случай, когда в первом приближении зависимость $\gamma(l)$ описывается линейной функцией $\gamma(l) = al$.

Здесь a - угловой коэффициент, равный интенсивности возрастания расхода топлива.

В этом случае:

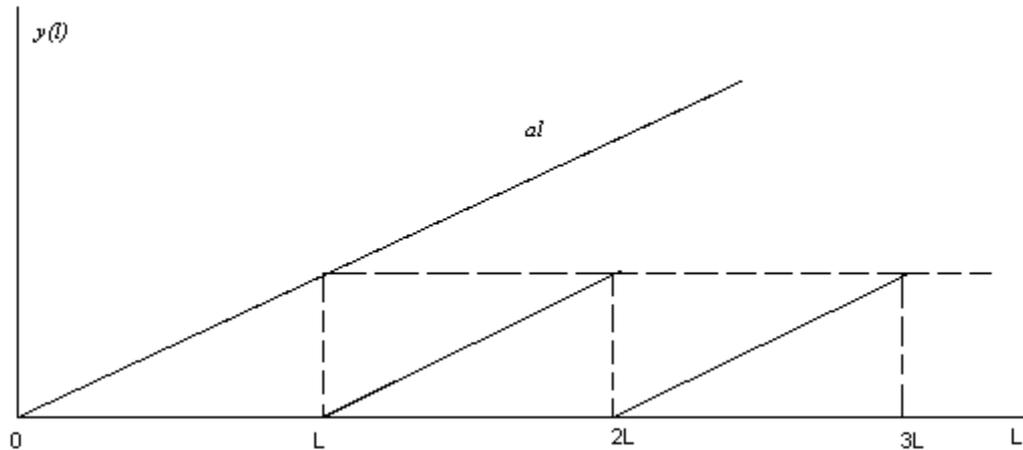


Рис. 2

$$\int_0^L \gamma(l) al = \int_0^L al dl = aL^2 / 2, \quad (12)$$

Подставив (12) в (11) и раскрыв скобки, получаем:

$$g(L) = C_T aL/2 + C_P/L, \quad (13)$$

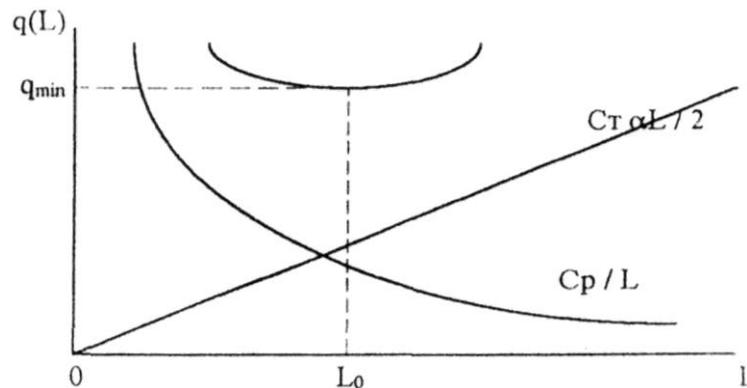


Рис. 3

В выражении (13) первое слагаемое - удельные затраты, обусловленные перерасходом топлива, возрастает с увеличением

наработки L между ремонтами и регулировками. Второе слагаемое - удельные затраты на проведение ремонта и регулировок, уменьшается с увеличением L . Очевидно, что их сумма имеет ярко выраженный минимум (рис.3.).

Оптимальное значение L_0 находится решением уравнения $q'(L) = 0$.
Взяв производную от (13) и приравняв ее нулю, получим:

$$C_T a / 2 - C_p / L_0^2,$$

Отсюда:

$$L_0 = \sqrt{2C_p / aC_T}, \text{ (км)} \quad (14)$$

Если за срок службы топливной аппаратуры было проведено k регулировок, то:

$C_T a (kL_0)^2 / 2$ - стоимость перерасходованного топлива при отсутствии регулировок;

$C_T a kL_0^2 / 2$ - стоимость перерасходованного топлива при проведении регулировок;

Стоимость топлива, сэкономленного за счет ремонта и регулировок:

$$\Delta C = C_T a (kL_0)^2 / 2 - C_T a kL_0^2 / 2 = C_T a L_0^2 (k^2 - k) / 2 = C_T a L_0^2 k (k - 1) / 2.$$

Чистая экономия с учетом стоимости ремонта и регулировок:

$$\Delta C = C_T L_0^2 k (k - 1) / 2 - k C_p.$$

Если зависимость $\gamma(l)$ описывается нелинейной функцией, то решение задачи об определении L_0 аналогично вышеизложенному. При этом, если интеграл от функции $\gamma(l)$ в уравнении (11) выражается в элементарных функциях, то существует аналитическое решение задачи. Если интеграл в (11) не "берется" или функция $\gamma(l)$ задана графически или таблично, то интегрирование может быть выполнено одним из численных методов, а значение L_0 находится непосредственно по графику $q(l)$.

Если ремонт и регулировка не полностью восстанавливают первоначальные свойства ДГУ, то после нее остается некоторый остаточный перерасход топлива $\delta(l)$.

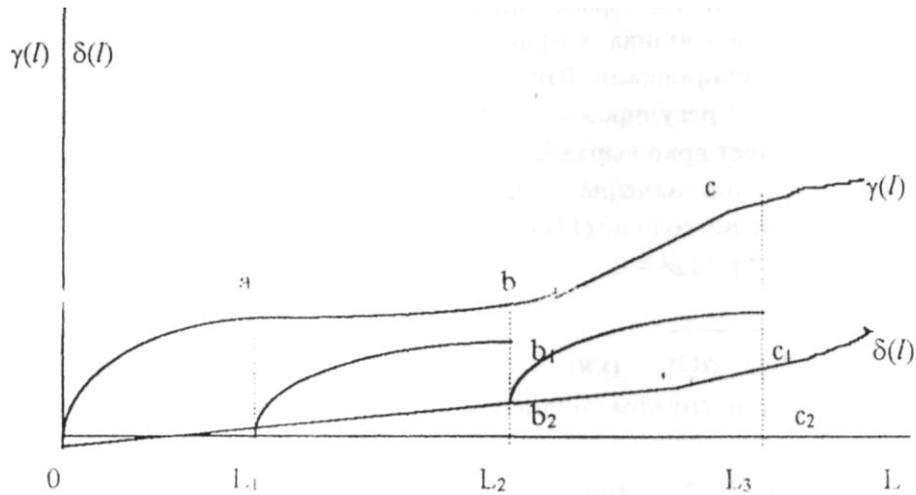


Рис.4.

Если функции $\gamma(l)$ и $\delta(l)$ нелинейны, то оптимальный интервал L_0 между ремонтами и регулировками будет переменной величиной, зависящей от порядкового номера ремонта и регулировки. Задача значительно упрощается, если функции $\gamma(l)$ и $\delta(l)$ линейны

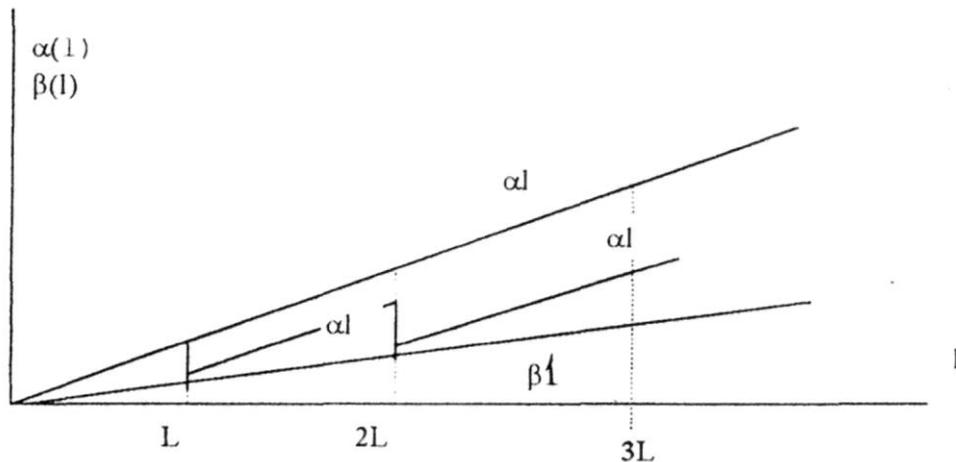


Рис 5.

Пусть $\gamma(l) = al$; $\delta(l) = \beta l$.

В этом случае целевая функция (11) записывается в виде:

$$q(L) = (C_T \int_0^L (a - \beta) / dl + C_p) / L = C_T (a - \beta) L / 2 + C_p / L.$$

Проделав соответствующие выкладки, получим оптимальную периодичность ремонтов и регулировок:

$$L_0 = \sqrt{2C_p / C_T (a - \beta)}.$$

После того, как остаточный перерасход топлива $\delta(l)$ достигнет некоторой критической величины, необходимо производить замену неисправной аппаратуры. Обозначим стоимость замены $C_{\text{зам}}$. Тогда оптимальная наработка до замены неисправных узлов будет равна:

$$L_{\text{зам}} = \sqrt{2C_{\text{зам.}}/\beta C_{\text{T}}}$$

В интервале до замены будет проведено $n = L_{\text{зам}}/L_0$ ремонтов и регулировок (берется целая часть отношения).

Стоимость сэкономленного топлива:

$$\Delta C_3 = C_{\text{T}}[\alpha(nL_0)^2/2 - \beta(nL_0)^2/2 - (\alpha - \beta)nL_0^2/2],$$

Чистая экономия с учетом стоимости ремонтов, регулировок и замены аппаратуры:

$$\Delta C_3 = C_{\text{T}}[\alpha(nL_0)^2/2 - \beta(nL_0)^2/2 - (\alpha - \beta)nL_0^2/2] - nC_{\text{р}} - C_{\text{зам}}.$$

В случае нелинейных зависимостей $\gamma(l)$ и $\delta(l)$ задача решается методами численного интегрирования на ПЭВМ.

5. Регулирование периодичности и объемов ремонтов в АС ППР

Рассчитанная таким образом оптимальная система ремонта является усредненной по всему парку локомотивов, т. к. оперирует статистическими характеристиками их надежности. Для каждого конкретного локомотива необходимо приспособить эту систему под его индивидуальные особенности. Так, в межремонтный период отказывает примерно 1 из 10 локомотивов. В этом случае возникает вопрос о выборе варианта восстановления отказавшего узла.

При восстановлении работоспособности отказавшего или близкого к отказу узла возможны два варианта проведения ремонта.

Вариант 1 - отказ узла произошел на „значительном расстоянии" (по пробегу) от того планового ремонта, на котором согласно принятой структуре должно производиться восстановление его работоспособности. При этом может оказаться целесообразным проведение непланового ремонта отказавшего узла, а затем планового в полном объеме. Не включать восстановление отказавшего и ранее восстановленного узла в объем планового ремонта нецелесообразно, так как при этом его наработка до следующего планового ремонта превысит допустимую и увеличится вероятность отказа в период до следующего ремонта, что приведет опять к неплановому ремонту, т. е. нарушится установленная периодичность плановых ремонтов, а следовательно, ухудшатся их технико-экономические показатели.

Вариант 2 - отказ узла произошел „вблизи" планового ремонта, в объем которого входит восстановление отказавшего узла. В этом случае может оказаться целесообразным провести ремонт в полном объеме несколько ранее установленного срока. При этом, кроме отказавшего,

восстанавливаются и другие элементы, которые в оптимальной структуре ремонтного цикла должны восстанавливаться вместе с ним.

Предпочтение должно быть отдано тому варианту, при котором обеспечиваются наименьшие суммарные затраты на плановые и неплановые ремонты.

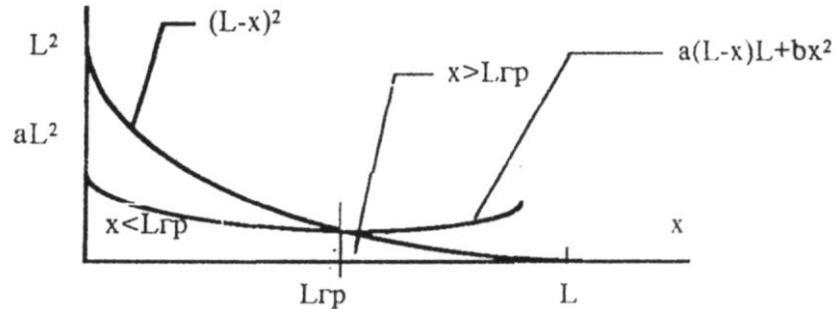


Рис. 6 Определение области непланового ремонта отказавшего узла.

Существует граничное значение наработки $L_{гр}$, разделяющее область возможных значений наработки на отказ x на два участка.

При $x < L_{гр}$ предпочтение отдается варианту 1, т. е. производится неплановый ремонт отказавшего узла (ремонт по "потребности"). В случае $x \geq L_{гр}$ выбирают вариант 2, т. е. производят досрочно очередной плановый ремонт, в объем которого входит восстановление отказавшего узла. Величина $L_{гр}$ зависит от соотношения стоимостей непланового ремонта отказавшего узла C_{ip} , его восстановления на плановом ремонте C_i и самого планового ремонта C_{Σ} т. е. зависит от того, в каком межремонтном интервале обнаружится потеря работоспособности диагностируемого элемента. Для интервалов, расположенных перед ремонтами разных объемов, величина $L_{гр}$ для одного и того же узла оказывается различной. Информация, необходимая для расчета C_{ip} , C_i и C_{Σ} , накапливается в банке данных в процессе проведения технического диагностирования оборудования локомотивов.

Выбор варианта восстановления производится в том случае, когда в результате диагностирования обнаружен отказ объекта. Если же в результате диагностирования установлено, что объект находится в работоспособном состоянии, то возникает необходимость в прогнозировании его состояния в ближайшем будущем.

Суть прогнозирования заключается в следующем. Если значение контролируемого параметра, определяющего работоспособность детали, узла или агрегата, не выходит за установленный для него допуск к назначенному для проведения планового ремонта пробегу, можно продолжить эксплуатацию рассматриваемого оборудования. Это позволит наиболее полно использовать его ресурс и уменьшить затраты на восстановление работоспособности. Чтобы реализовать эту возможность

при обеспечении безотказной работы локомотива и соблюдении безопасности движения поездов, необходимо не оперировать усредненными значениями, как это делается при определении показателей безотказности и долговечности оборудования, а изучать динамику изменения технического состояния каждого конкретного экземпляра оборудования, производя измерение его контролируемых параметров с определенной периодичностью.

Если при наработках l_1, l_2, \dots, l_n проведено n последовательных измерений контролируемого параметра, характеризующего работоспособность конкретного узла локомотива, то значения контролируемого параметра можно представить в виде ряда $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, который является реализацией случайной функции.

По результатам полученных n измерений контролируемого параметра осуществляют его прогнозирование, т. е. предсказывают какое значение x_{n+1} примет контролируемый параметр при следующем диагностировании при наработке l_{n+1} .

Если прогнозное значение x_{n+1} окажется лежащим внутри поля допуска, то восстановление рассматриваемого узла (детали) в момент n -го измерения контролируемого параметра целесообразно не производить, а отложить его до следующего ($n + 1$)-го, а возможно и более позднего момента измерения.

В том случае, когда при очередном ($n+1$)-м измерении значение контролируемого параметра выйдет за поле допуска, восстановление соответствующего узла необходимо осуществить после n -го измерения, иначе в период между наработками l_n и l_{n+1} , произойдет отказ этого узла. Таким образом, прогнозирование заключается в предсказании технического состояния оборудования локомотива в некоторый следующий момент времени на основе информации, полученной в текущий момент. Оно позволяет осуществлять ремонт в рамках планово-предупредительной системы по действительному техническому состоянию локомотива. Основные функциональные ее узлы показаны на рис. 7, в, а алгоритм функционирования строится следующим образом.

По результатам диагностирования оборудования за период наработки, достаточный для накопления необходимого объема информации, рассчитывается оптимальная структура ремонтного цикла, в которой каждый из включенных в нее элементов восстанавливается с определенной периодичностью. При дальнейшей эксплуатации локомотивов регулярно производится диагностирование технического состояния оборудования. Если при очередном диагностировании обнаруживается потеря работоспособности - отказ элемента, не имеющего контролируемого параметра, то наработка до отказа этого элемента $L_{отк}$ сравнивается с соответствующим граничным значением для выбора стратегии восстановления работоспособности. При $L_{отк} < L_{гр}$, осуществляется индивидуальное восстановление - неплановый ремонт

отказавшего элемента. Если же $L_{отк} > L_{гр}$, то досрочно выполняется очередной плановый ремонт в полном объеме.

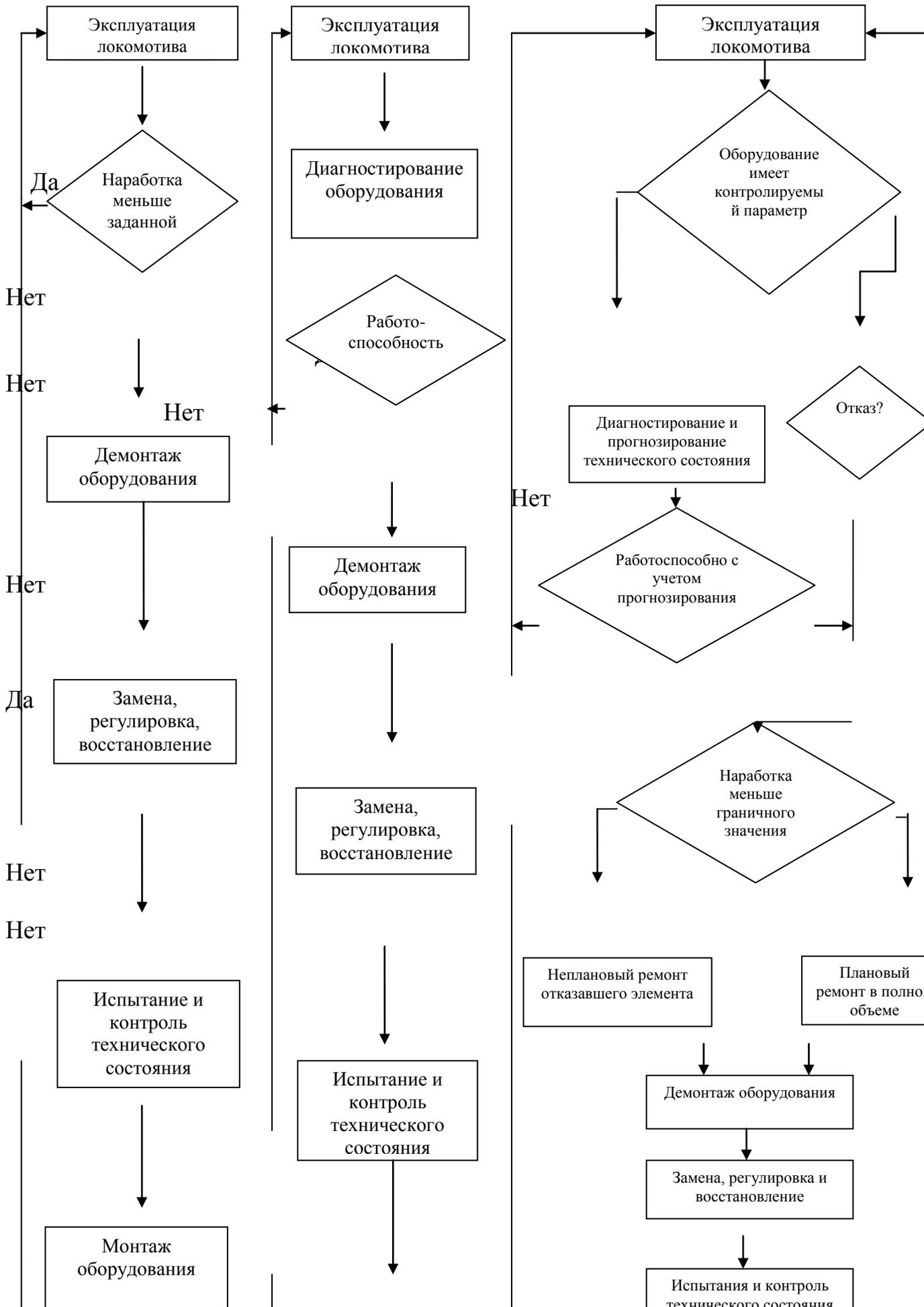
Если отказ узла возникает вблизи или обнаруживается при проведении планового ремонта, в объем которого не входит восстановление работоспособности данного узла, то объем ремонта увеличивается, т. е. в него включаются технологические операции по восстановлению работоспособности отказавшего узла.

Если в процессе эксплуатации локомотива не возникают непараметрические отказы, потребность в проведении ремонтов целиком обусловлена техническим состоянием оборудования, имеющего контролируемые параметры, т.е. параметрической надежностью.

При диагностировании оборудования, имеющего контролируемые параметры, производится прогнозирование его технического состояния, т.е. проверяют, сохранит ли оно работоспособное состояние до следующего момента диагностирования. В том случае, когда прогнозируется наступление отказа рассматриваемого элемента, текущее значение его наработки сравнивается с граничным значением. Если $L < L_{гр}$, то производится индивидуальное восстановление работоспособности только рассматриваемого элемента (ремонт по потребности). Если $L > L_{гр}$, то производится очередной плановый ремонт, так называемый ремонт по слабейшему узлу. Если при наработке L , когда по расчету предусмотрено проведение очередного планового ремонта, диагностирование констатирует, что все элементы локомотива находятся в работоспособном состоянии, а прогнозирование показывает, что это состояние сохраняется до следующего диагностирования, то эксплуатация локомотива продолжается до того момента, когда очередное прогнозирование покажет невозможность дальнейшей эксплуатации локомотива. Применение этой процедуры, как показывает моделирование на ЭВМ, позволяет увеличить межремонтную наработку локомотивов примерно на 30% по сравнению с расчетной.

Изложенные принципы определяют новый подход к построению системы технического обслуживания и ремонта, в которой изъятие локомотива из эксплуатируемого парка осуществляется в зависимости от действительного фактического состояния его оборудования. Эта система является плановой, так как объемы ремонтов рассчитаны заранее, т. е. различные восстановительные операции сгруппированы таким образом, что суммарные затраты на восстановление и поддержание работоспособного состояния локомотива сведены к минимуму. Неотъемлемой частью такой системы ТОР является техническое диагностирование, позволяющее не только оценить текущее состояние оборудования, но и прогнозировать тенденцию его изменения. Кроме того, эта система является предупредительной, т. к. основное ее назначение - не допустить потери работоспособности того оборудования, состояние которого можно оценить, изучая динамику изменения его контролируемых параметров, т. е. предупредить возникновение параметрических отказов.

И, наконец, эта система является автоматизированной, т. к. в ней автоматически производится регулирование периодичности и объемов плановых ремонтов в зависимости от фактического технического состояния каждого конкретного локомотива, определяемого с помощью средств технического диагностирования, микропроцессорной техники, ПЭВМ и автоматизированных рабочих мест.



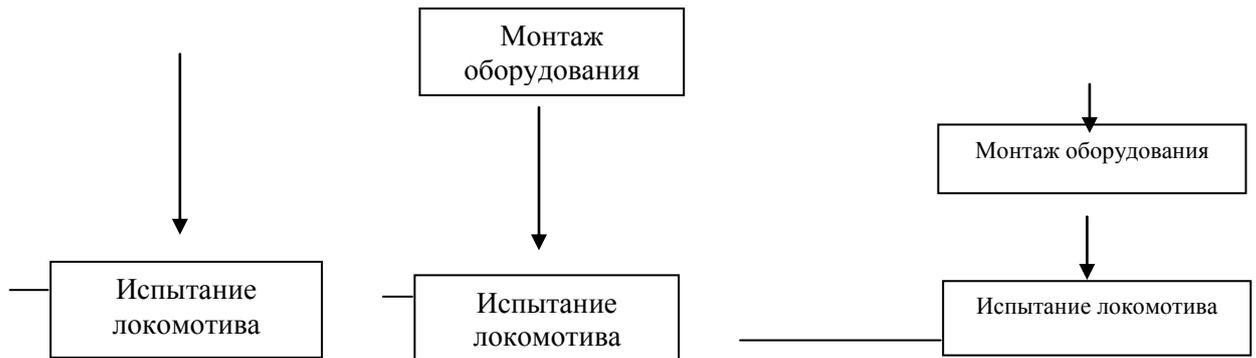


Рис. 7. Схема стратегии ТОР локомотивов по наработке (а), по состоянию (б) и предлагаемая (в).

6. Управление техническим состоянием ТПС в АС ППР

Основу системы анализа, прогнозирования и принятия решений при оценке технического состояния тягового подвижного состава, разработка мероприятий, направленных на повышение надежности оборудования, составляет информация, характеризующая его состояние.

Информация может вноситься на носители ЭВМ либо автоматически с различных устройств в процессе решения конкретных задач, связанных с оценкой технического состояния, испытания или эксплуатации оборудования, либо вручную с пульта ЭВМ из различных учетных форм, используемых в настоящее время в депо. При наличии локальной сети в локомотивном депо может легко осуществиться процесс занесения, обмена, систематизации и сортировки баз данных с различной информацией, необходимой для решения поставленных задач. Так параметры, характеризующие техническое состояние узлов и агрегатов, полученные в различных пунктах диагностирования, должны считываться автоматически с помощью соответствующих специалистов этих пунктов. Данные о параметрах колесных пар заносятся техником по замерам с клавиатуры ЭВМ в случае получения этих параметров традиционным измерительным инструментом или "сбрасываются" на носители из приборов с памятью, адаптированных с ЭВМ для считывания полученной в процессе измерения информации.

Данные по фактам смены оборудования должны заносятся в базы в соответствующих цехах и отделениях. Информация паспортов локомотива также должна храниться на носителях ЭВМ, т. к. большая часть ее необходима для оценки и использования технического состояния оборудования.

Для решения этих задач также необходима информация о наработках локомотивов от ремонтов различного вида, величине эксплуатируемого парка, датах прохождения ремонтов, осмотров и т. п. Большая часть этой информации может быть получена в процессе решения задач в системе АРМ "Технолог" посредством локальной сети из группы учета. Обеспечение функционирования локальной сети и работоспособности различных систем осуществляется инженером-системотехником.

Функционирование системы АРМ "Технолог" осуществляют инженеры-технологи, которые производят необходимые расчеты и подготавливают решения по текущим вопросам: оценку технического состояния оборудования и его прогнозирование, определение сроков и объемов ремонта, оценку эффективности различных мероприятий, направленных на улучшение технического состояния локомотивов и т. п. Принятие решений по важнейшим вопросам оптимизации системы ремонта, модернизации оборудования, повышения эффективности использования парка и т. п. должно осуществляться коллективно руководством депо с участием в этой работе ведущих специалистов.

Интегрировать всю работу по управлению техническим состоянием ТПС в локомотивном депо можно представить в виде последовательности следующих операций:

1. Сбор первичной информации о техническом состоянии ТПС;
 - информация об отказах в эксплуатации;
 - информация об изменениях контролируемых параметров;
 - информация о наработке ТПС от ремонтов разного объема;
 - экономическая информация о затратах и потерях, вызванных отказами и ремонтами оборудования ТПС.
2. Формирование базы данных о техническом состоянии ТПС;
3. Систематизация информации по видам оборудования и характерам повреждений;
4. Расчет параметров потока отказов по формуле (11) и построение эмпирических зависимостей $\omega(l)$ для каждого лимитируемого элемента и вида повреждения;
5. Аппроксимация эмпирической зависимости $\omega(l)$ теоретической кривой $\omega(l)$;
6. Расчет функции распределения ресурса $F(l)$ оборудования, имеющего контролируемые параметры;
 - расчет законов распределения и числовых характеристик контролируемых параметров или фиксированной наработки;
 - расчет зависимостей от наработки числовых характеристик распределений контролируемых параметров;
 - экстраполяция зависимостей числовых характеристик в область больших наработок и определение функции распределения ресурса $F(l)$.
7. Определение решением уравнения (6) параметра потока отказов $\omega(l)$ для оборудования, подверженного износу и старению;
8. Определение оптимальных межремонтных пробегов по критерию (5) для каждого типа лимитирующего оборудования и вида повреждения, а также для каждого вида контролируемого параметра;
9. Расчет оптимальной структуры ремонтного цикла методом динамического программирования;
10. Расчет для каждого вида отказов лимитирующих элементов величины $L_{гр}$ для всех видов плановых ремонтов, включенных в структуру ремонтного цикла;
11. При обнаружении отказа в эксплуатации или при очередном диагностировании принятие решения о проведении внепланового ремонта или о досрочном проведении планового ремонта в соответствии с блок-схемой 7;
12. При каждом диагностировании элементов, подверженных износу или старению, прогнозирование их остаточного ресурса с целью выявления возможности увеличения межремонтного пробега данного конкретного локомотива по сравнению с расчетной величиной.

Примерная схема информационных потоков по управлению техническим состоянием ТПС в локомотивном депо представлена на рис.8.

Однако, в АС ППР не только осуществляется "подгонка" периодичности и объемов плановых ремонтов к сложившемуся уровню технического состояния локомотивов, но и могут быть с максимальной эффективностью проведены работы по улучшению этого состояния, повышению надежности ТПС.

Прежде всего, после расчета оптимальной системы ППР можно определить наиболее "слабые" узлы, затраты на ремонт которых составляют наибольшую часть затрат на ремонт всего локомотива.

Пусть q_{i0} - минимальные удельные затраты на ремонт одного отдельно взятого элемента;

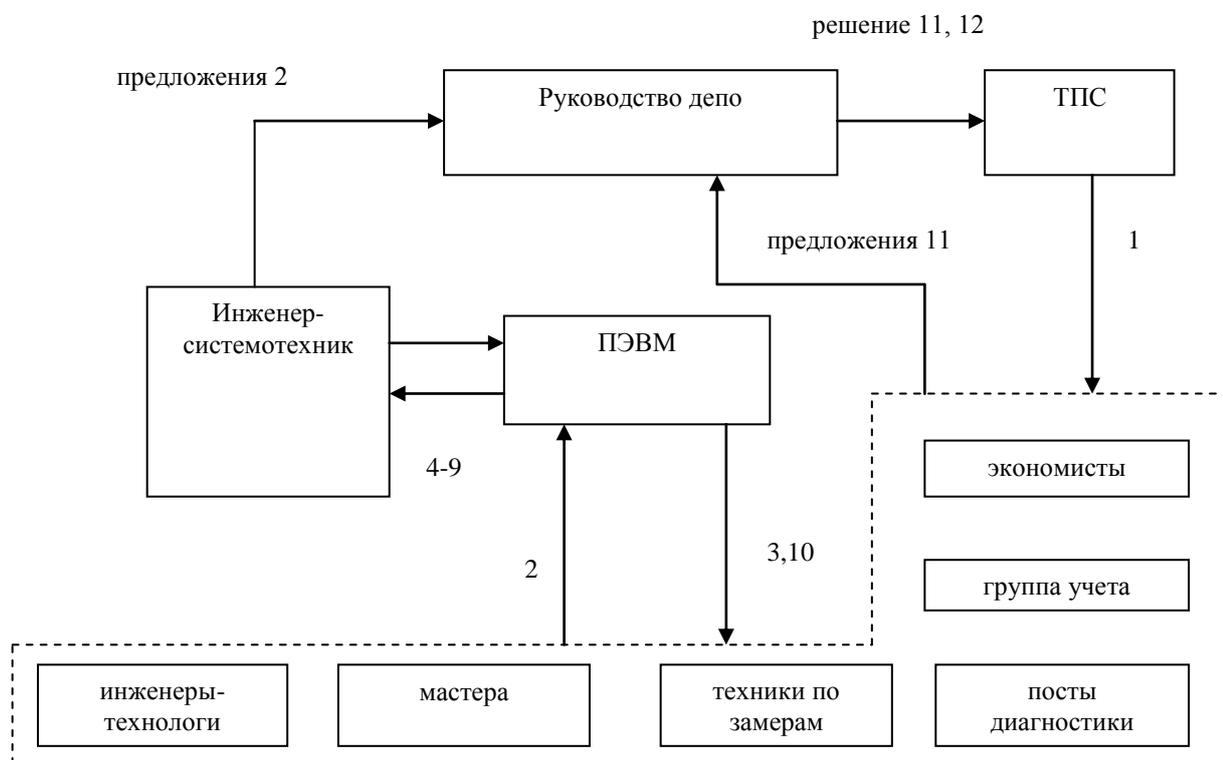


Рис. 8 Схема управления техническим состоянием в локомотивном депо

q_i - удельные затраты на ремонт i -го элемента после включения его в структуру ремонтного цикла;

q_{Σ} - суммарные удельные затраты на ремонт всех элементов, включенных в структуру ремонтного цикла.

Очевидно, что $q_{i0} \leq q_i$ т. о. при включении в структуру ремонтного цикла (увязка межремонтных пробегов по принципу кратности) происходит отклонение от точки оптимума в ту или иную сторону.

Обозначим:

$k_{1i} = q_i / q_{i0}$ - коэффициент, учитывающий отклонение от точки оптимума;

$k_{2i} = q_i / q_{\Sigma}$ - коэффициент, учитывающий долю затрат на ремонт i -го элемента в затратах на ремонт локомотива.

Коэффициент $k_i = k_{1i} * k_{2i}$ показывает значимость данного элемента в структуре ремонтного цикла локомотива. Очевидно, чем больше коэффициент k_i , тем больший вес имеют методы ремонта этого элемента в общей совокупности затрат на ремонт локомотива, т. о., повышая надежность этого элемента, можно добиться максимальной эффективности.

Таким образом, определив элемент с наибольшим значением k_i , можно разрабатывать конкретные мероприятия по повышению его надежности с учетом конструктивных особенностей данного элемента, физических процессов, приводящих к его отказу, условий нагружения и т. п.

Оценить эффективность проведенных мероприятий можно по функциям суммарных удельных затрат на выполнение плановых и неплановых ремонтов (11).

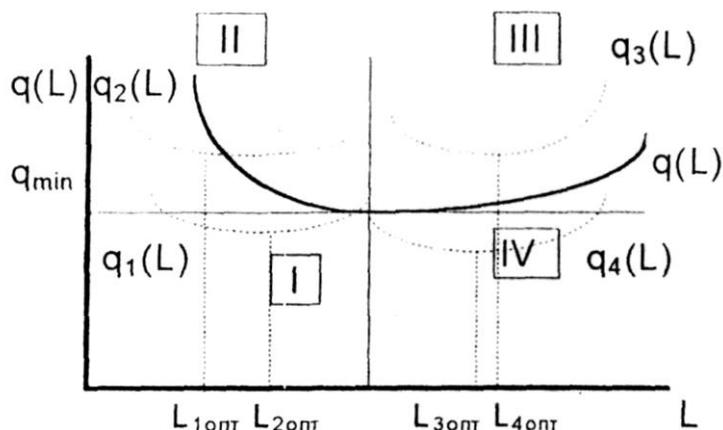


Рис. 8 Функция суммарных удельных затрат

Допустим, что до проведения мероприятия по увеличению ресурса оборудования конкретного наименования функция суммарных удельных затрат была $q(L)$ с оптимальным межремонтным пробегом $L_{опт}$.

После проведения мероприятия функция суммарных удельных затрат может оказаться в одном из четырех квадрантов.

Очевидно, что если оптимальный межремонтный пробег переместится в I или II квадрант ($L_{1опт}$, $L_{2опт}$), то цель увеличения межремонтного пробега оборудования не достигнута, т. е. произведенные мероприятия следует признать неэффективными.

Увеличение межремонтного пробега (при больших удельных затратах на выполнение ремонтов оборудования также будет неэффективным (квадрант III с $L_{3опт}$). Таким образом, мероприятия можно считать достигшими цели, если функция суммарных удельных затрат $q_4(L)$ расположится в IV квадранте с оптимальным пробегом $L_{4опт} \geq L_{опт}$.

Однако, окончательный ответ об эффективности проведенных мероприятий может быть получен только после расчета новой структуры ремонтного цикла при новом значении оптимального межремонтного пробега L_{i0} . Если при пересчете структуры ремонтного цикла произойдет изменение периодичности и (или) объемов ремонтов всех элементов, и оно приведет к уменьшению суммарных удельных затрат на ремонт всего локомотива (q_{Σ}), то мероприятия по повышению надежности i -го элемента можно считать эффективными.