

## ЗАДАЧИ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ

Раціональна організація процесів технічного обслуговування і ремонту багато в чому забезпечує якість функціонування тягового рухомого складу. Введені поняття функціоналів готовності і технічного використання для визначення часу між технічними обслуговування (ТО) локомотивів. Представлена декомпозиція цільової функції процесу ТО. Отримані математичні вирази для формулювання задач раціональної організації технічного обслуговування і ремонту.

Рациональная организация процессов технического обслуживания и ремонта во многом обеспечивает качество функционирования тягового подвижного состава. Введены понятия функционалов готовности и технического использования для определения времени между техническими обслуживания (ТО) локомотивов. Представлена декомпозиция целевой функции процесса ТО. Получены математические выражения для формулировки задач рациональной организации технического обслуживания и ремонта.

The rational organizations of the processes of technical services and repairs to a large extent provides for operational quality of traction rolling stock. The article introduces notions of functionals of readiness and technical use for estimation of timeframes between the technical services (TS) of locomotives, represents decomposition of the purpose function of TS process and obtains mathematical forms for formulating the tasks of rational organization of technical servicing and repairs.

Качество функционирования тягового подвижного состава в эксплуатации зависит не только от его свойств, заложенных при проектировании и изготовлении, но и от рациональной организации технического обслуживания и ремонта (ТО).

В нормативной документации [1] и в ряде научных работ [2; 3] предложено оценивать надежность при помощи комплексного показателя – коэффициента готовности  $K_r$ .

Однако  $K_r$  дает точечную оценку, которая не учитывает факторы организации технического обслуживания и ремонта, что приводит к существенной ошибке в оценке надежности.

Накопленный автором данной работы опыт применения математического моделирования на основе марковских и полумарковских процессов позволил предложить вместо  $K_r$  двойной критерий: функционал готовности  $K_r(T)$ , применяемый для оценки допустимого времени  $T_{\text{доп}}$ , и функционал технического использования  $K_{\text{ТИ}}(T)$ , позволяющий определять значение оптимального времени  $T_{\text{опт}}$  между ТО локомотивов в точке максимума  $K_{\text{ТИ}}(T)$ . Для применения предложенных критериев в качестве целевой функции рациональной организации процессов ТО следует выбирать рациональную периодичность обслуживания

$$n_{\text{рац}} = 8760/T_{\text{рац}},$$

где 8 760 – число часов в году;  $T_{\text{рац}}$  – рациональное время между ТО.

При этом должно соблюдаться условие

$$T_{\text{опт}} \leq T_{\text{рац}} \leq T_{\text{доп}}.$$

При исследовании производственных процессов одним из важных является этап постановки задачи. Постановка задачи исследования с помощью математических моделей приобретает еще большую важность, так как формализация производственных процессов в некоторых отношениях более сложна, чем моделирование технических систем. Действительно, если при формализации задач исследования собственно систем рассматривается все многообразие их параметров, пусть и в очень сложном взаимодействии, то формализация процесса ТО предусматривает обязательное рассмотрение не только самой системы, но и процесса обслуживания, вплоть до учета, например, профессиональной подготовки обслуживающего персонала, воздействий окружающей среды и т. д. [4].

Для того чтобы найти оптимальный  $T_{\text{опт}}$  рациональный  $T_{\text{рац}}$  или приемлемый  $T_{\text{доп}}$  варианты решения задачи профилактического обслуживания, необходимо сначала знать, в чем она состоит, т. е. поставить задачу.

Обычно на первых этапах формализации процесса ТО постановку задачи рекомендуется делать в вербальном виде. На этом этапе в словесной форме описывается цель, которую необходимо достигнуть при решении задачи.

Уже здесь должны быть четко выделены цели исследования, объект или процесс моделирования и предполагаемые способы его осуществления. Последнее несколько сужает возможности разработки моделей, но, тем не менее, разработчик должен в общих чертах представлять, какие модели он будет разрабатывать: физические, аналоговые, имитационные или какие-то другие. Очевидно здесь же необходимо, хотя бы в самом общем виде, указать ограничения и возможные допущения в исследуемом процессе.

Неформализованная (вербальная) постановка задачи должна позволять реально осуществить ее выполнение в предположении дальнейшего усложнения или упрощения последней. Должна быть предусмотрена возможность введения новых ограничений или альтернативных вариантов. Например: определить рациональное время между ТО системы по  $K = \overline{1, L}$  техническим параметрам и т. д.

Следующим шагом в постановке задачи является ее формализация.

В настоящее время наиболее употребительными являются следующие методы формального описания постановки задач оптимизации процессов технического обслуживания и ремонта:

1. Постановка задачи в виде алгебраических моделей с линейными ограничениями, учитывающих или не учитывающих динамику процесса;

2. Постановка задачи представлением рассматриваемого процесса в виде сложного математического агрегата с множеством собственных состояний  $s(t) \in S$ , управляющих воздействий  $x(t) \in X$ , входных параметров  $a(t) \in A$ , ограничений  $q(t) \in Q$  и множества выходных параметров  $y(t) \in Y$ .

3. Постановка задачи в виде дерева целей, на верхнем уровне которого помещается критерий оптимизации, определенно связанный с целевой функцией процесса. На следующих уровнях выполняется декомпозиция критерия до свойств, которые могут быть определены количественно с помощью сбора и обработки статистических данных, математического моделирования на более простых моделях, экспертным опросом или другим доступным методом.

Назначение любых методов постановки задач в формализованном виде состоит в установлении связей между переменными состояний, в которых может находиться процесс и переменными управления, воздействующих на переходы процесса из состояния в состояние с учетом возможных ограничений. Следует отметить, что всегда целевая функция оптимизируется по какому-то критерию.

Поэтому перед постановкой задачи, в какой бы форме она не делалась, необходимо выбрать критерий (в однокритериальных) или критерии (в многокритериальных задачах) организации исследуемого процесса.

Рассмотрим на простом численном примере необходимость введения количественных критериев организации технического обслуживания и ремонта локомотивов. Кроме этого пример позволит ввести в работу понятие «тактика обслуживания» и с его помощью показать, что существуют допустимые, рациональные и оптимальные по выбранным критериям варианты тактических решений.

Пусть известны объект (в нашем случае – локомотив) ТО, параметры, по которым он обслуживается, а функция распределения времени безотказной работы объекта по одному из обслуживаемых параметров представлена на рис. 1.

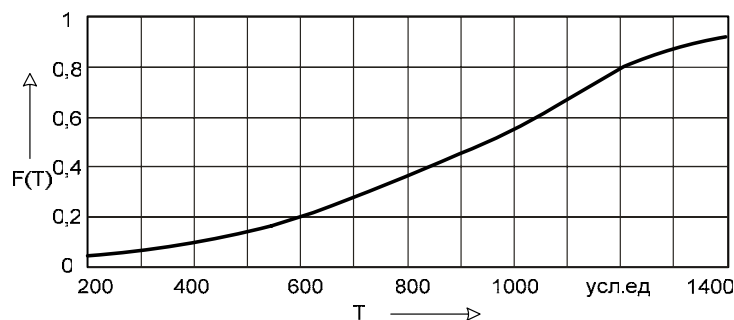


Рис. 1. График функции распределения наработки на отказ

Известно, что ресурс объекта по выбранному параметру  $t_p = 1000$  у. е. времени, время аварийного ремонта  $t_{ав} = 50$  ед., а время планового технического обслуживания по параметру  $t_{ТО} = 10$  ед.

Рассмотрим несколько вариантов организации профилактического обслуживания объекта и сравним их. В качестве критерия для сравнения вариантов выберем коэффициент технического использования

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{T_{\text{об}}}{T_{\text{об}} + T_{\text{ав}} + T_{\text{ТО}}},$$

где  $T_{\text{об}}$  – время нахождения объекта в исправном состоянии;  $T_{\text{ав}}$  – время, затраченное на аварийный ремонт;  $T_{\text{ТО}}$  – время, затраченное на профилактическое обслуживание.

Считая число отказов  $n$  за принятую условную единицу времени примерно равным отношению вероятности отказа к вероятности безотказной работы, рассмотрим следующие тактические варианты обслуживания.

**Вариант 1.** Объект обслуживается по истечении времени ресурса  $t_p = 1000$  ед.

Обозначив время между ТО через  $T_i$ , при  $i = 1, 2, 3, 4$  получим:

$$T_1 = t_p = 1000 \text{ ед.};$$

$$F(T_1) = 0,575;$$

$$n = \frac{0,575}{0,425} = 1,352.$$

Следовательно, за цикл  $T_1$  на ремонт будет затрачено

$$T_{\text{ав}} = n \cdot t_{\text{ав}} = 1,352 \cdot 50 = 67,6 \text{ у. е. времени.}$$

Так как профилактическое обслуживание при этом варианте не производится, то  $T_{\text{ТО}} = 0$ , тогда

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{1000}{1000 + 67,6} = 0,936.$$

Рассмотрим, нельзя ли улучшить техническое состояние объекта по параметру, если уменьшить время между обслуживаниями?

**Вариант 2.** Объект обслуживается через  $T_2 = 800$  ед. При этом  $F(T_2) = 0,38$ ;  $n = 0,612$ ;  $T_{\text{ав}} = 30,64$ ;  $T_{\text{ТО}} = 10$ ,

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{800}{800 + 30,64 + 10} = 0,952.$$

Введение предупредительного технического обслуживания через  $T_2 = 800$  у. е. времени повысило коэффициент технического использования.

**Вариант 3.** При  $T_3 = 600$  ед.;  $F(T_3) = 0,2$ ;  $n = 0,25$ ;  $T_{\text{ав}} = 12,5$  ед.  $T_0 = 10$ ;  $K_{\text{ТИ}} = 0,964$ .

Сравнивая значения  $K_{\text{ТИ}}$ , можно сделать вывод, что и дальнейшее уменьшение времени между предупредительными обслуживаниями будет улучшать техническое состояние объекта, однако это не так. При частых обслуживаниях мы предупреждаем отказы и этим уменьшаем время  $T_{\text{ав}}$ , но такой режим ведет к росту потерянного времени за счет обслуживания –  $T_{\text{ТО}}$ . Это подтверждается следующим расчетам.

**Вариант 4.**  $T_4 = 500$  у. е. времени;  $F(T_4) = 0,17$ ;  $n = 0,204$ ;  $T_{\text{ав}} = 10,24$  ед;  $T_0 = 20$  ед. Понижение среднего числа отказов за цикл приводит к уменьшению времени  $T_{\text{ав}}$ , однако, возрастает время  $T_{\text{ТО}}$  и

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{500}{500 + 10,24 + 20} = 0,943$$

по сравнению с предыдущим вариантом значительно понижается.

График зависимости  $K_{\text{ТИ}} = F(T)$ , построенный по результатам проведенных выше расчетов, показан на рис 2.

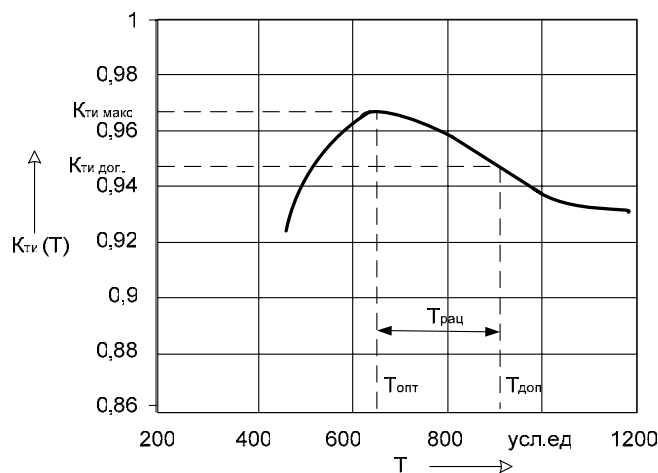


Рис. 2. Зависимость  $K_{\text{ТИ}}$  от времени между обслуживаниями

Из него видно, что существует оптимальное время  $T_{\text{опт}}$  между обслуживаниями объекта, соответствующее максимуму  $K_{\text{ТИ}}$ . На этом же графике отмечено допустимое время между  $T_0 \dots T_{\text{доп}}$ , соответствующее минимально допустимому значению  $K_{\text{ТИ}} = K_{\text{ТИдоп}}$ .

Время  $T_{\text{опт}} \leq T_{\text{рац}} \leq T_{\text{доп}}$  назовем рациональным временем между обслуживаниями. Периодичность ТО с длительностью  $T_{\text{рац}} = T_{\text{доп}}$  является предпочтительной.

В практике эксплуатации объектов возможно менять не только периодичность обслуживания, но и другие параметры, например, техническую оснащенность ремонтных работ, выполнять их за разное время и др. Для формальной характеристики этого удобно пользоваться следующими обозначениями и терминологией.

Будем считать, что в состоянии  $S_i$  имеется возможность осуществлять одно или несколько из группы возможных управляющих воздействий (УВ) на процесс. Выбор УВ выполняется при каждом переходе процесса из состояния  $S_i$  в  $S_j$ . Выбор конкретного управляющего воздействия, осуществляемый в момент перехода, определяет вероятностный механизм эволюции процесса на следующий шаг.

Совокупность правил, однозначно определяющих управляющие воздействия для всех состояний процесса обслуживания, будем называть стратегией обслуживания.

В этой работе будут рассматриваться только стратегии, удовлетворяющие марковским свойствам.

Создание циклов эксплуатации является одним из действенных методов повышения эффективности и жизнедеятельности объектов. Одной из характеристик циклов эксплуатации является время  $T$  между обслуживанием по ее отдельным техническим параметрам или их группам. Уменьшение  $T$  приводит к возрастанию числа циклов на определенном периоде эксплуатации объекта и к снижению эффективности его использования. Но при этом улучшаются надежные характеристики объекта. Увеличение  $T$  до определенного значения приводит к понижению характеристик безотказности, уменьшению расхода ресурсов на обслуживание и повышения эффективности использования объекта. Дальнейшее увеличение  $T$  может вызвать резкое снижение параметров безотказности, возрастание времени на ремонт

и, как следствие, понижение эффективности использования объекта. Определение рационального времени между циклами является задачей данной работы, поставленной в общем виде. Наиболее вероятным путем решения ее является математическое моделирование. Для количественной характеристики вариантов назначения  $T$  рассмотрим постановку задачи в формализованном виде. Для большей наглядности формализацию задачи представим декомпозицией целевой функции (см. рис. 2). На верхнем уровне декомпозиции поместим целевую функцию процесса ТО  $T_{\text{опт}} \leq T_{\text{рац}} \leq T_{\text{доп}}$ .

Выбор конкретного значения времени  $T_{\text{рац}}$  определяется стоимостным  $C_{\text{рац}}$  и надежностными  $K_{\text{ТИ}}(T)$  и  $K_{\text{Г}}(T)$  критериями, расположенными на втором уровне декомпозиции. Значения критериев определяются временными и стоимостными параметрами  $T_j(T)$  и  $C_j(T)$ . Временные параметры  $T_j(T)$  зависят от вероятностей  $\pi_j(T)$  нахождения объекта в исправном  $S_0$  состоянии, работы при разрегулировке  $S_i$ , состояниях явного  $S_n$  или скрытого  $S_{(n+1)}$  отказов, а также вероятностей  $\pi_{\text{ТО}}$  нахождения в состояниях технического обслуживания исправного  $S_{\text{ТО}}$ , разрегулированного  $S_{\text{ТО}}$ , или находящегося в скрытом отказе  $S_{(n+1)\text{ТО}}$  объекта. Кроме вероятностей нахождения объекта в  $S_j$ -м состоянии на времена  $T_j(T)$  оказывают влияние среднее время  $\omega_j(T)$  перехода объекта из  $j$ -го состояния в  $i$ -е и среднее наблюдаемое время  $\nu_j(T)$  этого же перехода. Оценить вероятности переходов из одного состояния в другое можно, если известны функции распределения (ФР) времени  $F_{ij}(T)$ .

Обозначим:  $F_{0n}(T)$  – ФР времени безотказной работы объекта по  $k$ -му параметру;  $F_{0i}(T)$  – ФР времени разрегулировки до предельной стадии функционирования по  $k$ -му параметру;  $F_{in}(T)$  – ФР времени безотказной работы разрегулированного по параметру объекта;  $F_{\text{ТО}}(T)$  – ФР времени проверки  $\tau_{\text{п}}$  объекта по параметру, за которое в него не вносится отказ.

Количественные значения ФР  $F_{ij}(T)$  зависят от характеристик как обслуживаемого объекта, так и обслуживающей системы. Среди них выделим интенсивности  $\lambda_{0n}$  внезапного пере-

хода из  $S_0$  в  $S_n$  состояние, интенсивности  $\lambda_{0n}$  постепенных переходов из состояния исправной работы  $S_0$  в состояние работы при регулировке  $S_0$  и интенсивности  $\lambda_{in}$  перехода из  $S_0$  в  $S_n$  состояние. Временные параметры, помещенные на этом же уровне, характеризуют среднее время выполнения следующих операций:  $t_{ав}$  – аварийного ремонта;  $t_{ТО}$  – технического обслуживания;  $t_p$  – регулировки;  $t_s$  – поиска неисправности.

Техническое обслуживание предполагает участие в нем системы диагностики состояния обслуживаемого объекта. Ее влияние на процесс ТО учтем через ошибки диагностирования первого  $\alpha$  и второго  $\beta$  родов.

Интенсивности отказов, временные и вероятностно-диагностические характеристики помещены на последнем уровне декомпозиции целевой функции исследуемого процесса и определяются с помощью математического моделирования, сбора и обработки статистических данных или методами экспертных опросов.

Из приведенной декомпозиции целевой функции следует, что:

$$T_{рац} = \Phi \{K_{ТИ}(T), K_r(T)\}; \quad (1)$$

$$K_{ТИ}(T) = \Phi \{\pi_i(T), \omega_i(T), v_i(T), S_i(T)\}; \quad (2)$$

$$\pi_i(T), \omega_i(T) = \Phi \{F_{ij}(T), t_a, t_n, t_r, t_s\}; \quad (3)$$

$$v_i(T) = \Phi \{F_{ij}(T), \alpha, \beta, t_a, t_n, t_r, t_s\}; \quad (4)$$

$$F_{ij}(T) = \{T, \lambda_{ij}(T)\}. \quad (5)$$

Выражения (1)–(5) представляют собой математическую формулировку задачи и определяют порядок ее решения от (5) к (1).

Из них логически вытекают задачи следующего этапа исследований – разработка математических моделей, объединяющих все переменные, входящие в формализованную постановку задачи исследования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 480 с.
3. Герцбах Н. Б. Модели профилактики. – М.: Сов. радио. 1969. – 216 с.
4. Держо Г. Г. Моделирование периодичности проверок радиоэлектронных систем с отказами при обслуживании // Вопросы радиоэлектроники: Общие вопросы радиоэлектроники. – 1990. – Вып. 1 – С. 101–105.

Поступила в редколлегию 21.09.2005.