

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ СОВОКУПНОГО (ИНТЕГРАЛЬНОГО) СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВА

А. К. Пляскин¹, А. А. Потапов²

¹ *к.т.н., доцент, проректор по учебной работе ФГБОУ ВО ДВГУПС,
г. Хабаровск*

² *аспирант кафедры «Транспорт железных дорог» ФГБОУ ВО ДВГУПС*

Аннотация. В эксплуатации локомотивов участвует большое количество персонала, в их числе поездные и локомотивные диспетчеры. В отличие от других участников процесса эксплуатации (машинисты, персонал ТООР) они не пользуются специальными средствами (маттаппарат, оборудование) для оценки состояния локомотивов, хотя именно от решения диспетчеров зависит постановка локомотива в состав того или иного поезда. Рассмотрены несколько видов математических моделей для интегральной (совокупной) оценки состояния отдельного локомотива, уже применяемые или пригодные для данной цели. Сделан вывод о возможности развития применения отдельных моделей, или их синтеза, или применения агрегированного подхода к их использованию для интегральной оценки технического состояния локомотива.

Ключевые слова: техническое состояние, интегральная оценка, надёжность, безотказная работа, локомотив, поездной диспетчер, математическая модель

Эксплуатация локомотива и их парка требует участия большого количества персонала. Их краткая характеристика представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Участники процесса эксплуатации локомотива

Участник	Цель
Диспетчерский аппарат	Управление движением, обеспечение безопасности перевозок
Дирекция тяги	Управление парком в целом, обеспечение заявок на тягу
Эксплуатационные локомотивные депо	Управление, обслуживание и контроль работоспособности локомотива непосредственно в движении
Службы ТООР (сервис)	Повышение коэффициента готовности локомотива

В зависимости от стороны отличаются методы, используемые ими для управления парком и для влияния на техническое состояние локомотива. Если для сервиса, эксплуатации и управленческого персонала дирекций

применяется множество инструментов (в т. ч. матаппарат), то диспетчерский аппарат Дорожных центров управления перевозками (ДЦУП) в своей работе преимущественно полагается на экспертность и доклады нижестоящих участников процесса управления (машинисты, ДСП, дежурные по депо и т.д.).

Очевидно, что методы и средства оценки состояния локомотивов, в т.ч. на базе бортовых микропроцессорных систем (диагностические и тревожные сообщения для машинистов) или автоматизированных рабочих мест (АРМ) диагностов в депо, имеют ограниченную применимость для диспетчеров ввиду разного характера работы, в том числе из-за необходимости непрерывного и оперативного принятия решений со стороны диспетчеров о возможности постановки того или иного локомотива под поезд. Диспетчеров интересует состояние отдельного локомотива, а не их парка или отдельных узлов. Приведем уровни определения состояния локомотива в таблице 2.

Таблица 2 – Уровни определения и оценки технического состояния локомотива

Уровень	Методы оценки состояния	Участники процесса
Отдельный узел, система локомотива	Экспертные методы оценки (визуальный, инструментальный контроль), статистическая оценка, испытания, контроль данных со стороны МСУ	Ремонтный персонал депо, мастера станций реостатных испытаний, ТЧД, ТЧМ
Отдельный локомотив	Экспертные методы оценки, статистическая оценка, испытания, контроль данных со стороны МСУ или АСУ	Ремонтный персонал депо, мастера станций реостатных испытаний, ТЧМ, ТЧД, ДСП, ТНЦ, ДНЦ, ТЧЭ, ТЧР, Т, Д
Парк локомотивов	Статистические методы (оценка срока эксплуатации, пробега, числа отказов по парку и т.д.), контроль со стороны АСУ	ДНЦ, ТНЦ, ТЧД, ТЧЭ, ТЧР, Т, Д

На рисунке 1а представлены области работоспособности и области отказов технической системы относительно пространства параметров и соответствующих им диагнозов. Точками М1, М2, М3 представлен пример отказных состояний отдельных категорий оборудования, характеризуемого неким набором параметров. В настоящее время имеется большой массив данных о параметрах, характеризующих нахождение отдельных видов узлов и деталей в областях работоспособности и отказов (множество точек $M_1 \div M_N$). В то же время возникают вопросы о способах разделения области работоспособности на условные зоны различной надёжности (рисунок 2б) и об оперативных способах такой оценки, применимых, например, со стороны диспетчерского аппарата. Основная цель такой оценки со стороны диспетчера – поставить под поезд критической массы надёжный локомотив и тем самым минимизировать вероятность отказа локомотива в пути следования в данной поездке.

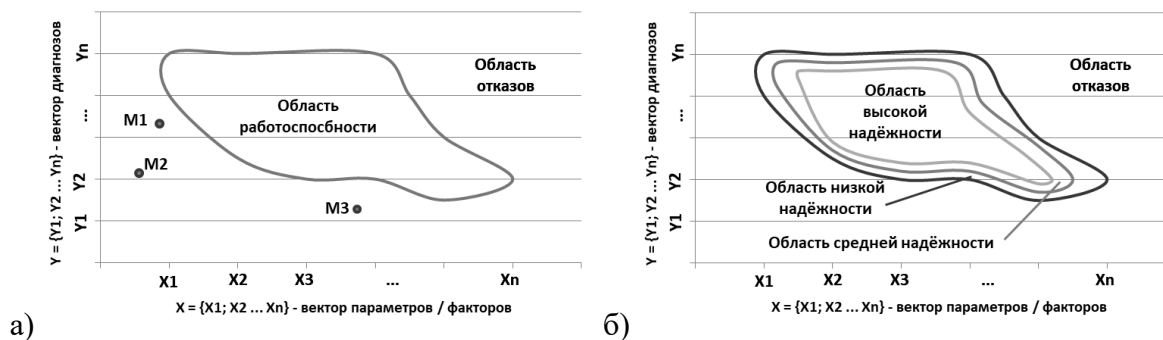


Рисунок 1 – а) Области работоспособности и отказов;
 б) Разделение области работоспособности по степени надёжности

Какие методы и средства оценки состояния локомотивов применимы именно для диспетчерского аппарата для достижения данной цели? Уровень повреждаемости локомотива – интегральный параметр, отражающий действие всей совокупности различных эксплуатационно-ремонтных условий и факторов: серийной структуры парка, параметров участков его обращения, спектра масс поездов, соотношения объёмов грузовой, пассажирской работы и т.д. [1].

Всё возрастающий объём информации о состоянии локомотива затрудняет оценку его общего состояния и принятия решения на основе этого объёма. Часто приходится пользоваться только качественной оценкой технического состояния. Поэтому важное значение приобретает постановка и развитие методов автоматизированного решения задач качественной теории сложных систем [2].

Представляется возможным применить методы интегральной или совокупной, обобщённой оценки технического состояния [3].

Преимущества и недостатки таких методов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Преимущества и недостатки методов интегральной оценки [3, 4]

Преимущества	Недостатки
Минимизация ошибок I и II родов	Сложность разработки модели
Обобщение имеющихся данных по состоянию технического объекта	Отсутствие учёта отдельных значимых данных вне модели
Сокращение времени на принятие управленческого решения за счёт упрощения оценки	Потеря точности в оценке
Ранжирование технических объектов по состоянию	

Отметим, что применение методов интегральной оценки не исключает уже используемых методов оценки технического состояния, а только дополняет их.

Общий подход к оценке ресурса (состояния) технических систем железнодорожного транспорта изложен в стандарте ГОСТ Р 57445-2017 и состоит из следующих этапов: общий анализ состояния технической системы, категорирование и декомпозиция объекта, выбор метода определения ресурса,

анализ повреждающих факторов и механизмов повреждения, расчётно-экспериментальное определение ресурса, принятие решения [5].

Рассмотрим возможные методы интегральной оценки [1].

1. Для оценки состояния локомотива (или их парка) традиционно используются показатели надёжности, такие как средний пробег до отказа, интенсивность отказов, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, определяемые по формулам (1-4):

$$L_1 = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{\sum_{i=1}^N r_i}, \text{ км}, \quad (1)$$

$$\lambda(\Delta l) = \frac{r(\Delta l)}{N_{\text{ср}} \cdot \Delta l}, \frac{1}{\text{км}}, \quad (2)$$

$$K_{\Gamma} = \frac{T_1}{T_1 + T_2}, \quad (3)$$

$$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma} \cdot p(t_{\text{ог}}), \quad (4)$$

где l_i – наработка до отказа за i -й период, км;

r_i – число отказов за i -й период;

$r(\Delta l)$ – число отказов за пробег Δl ;

$N_{\text{ср}} = \frac{N(l) + N(l + \Delta l)}{2}$ – число исправно работавших локомотивов за пробег Δl ;

T_1 – время работы локомотива, ч;

T_2 – время нахождения локомотива на ТОиР, ч [6];

$p(t_{\text{ог}})$ – вероятность безотказной работы объекта в произвольно заданный момент времени $t_{\text{ог}}$.

Данные показатели являются простыми в расчёте и обработке, универсальными для тепловозов и электровозов; в то же время они часто усредняют картину фактического положения дел по всему парку.

2. Вероятность отказа локомотива зависит от многих факторов, в числе которых его конструктивное исполнение, качество выполнения ТОиР, характер эксплуатации, величина пробега, качества регулирования и т.д.

Влияние каждого из факторов в отдельности на величину параметра потоков отказов ω невелико и для его выявления целесообразно использовать метод факторного анализа, результаты которого в общем случае представляются в следующем виде (5)

$$Y = k_1 X_1^a + k_2 X_1^b + \dots + k_i X_i^o + \dots + k_n X_n^z + C, \quad (5)$$

где a, b, o, z – показатели степени для параметров типа X_i ;

C – свободный член уравнения;

k_i – коэффициент эластичности, характеризующий степень влияния каждого из факторных показателей на Y .

Пример формул для нескольких факторов приведём ниже. Фактор серийности, фактор длительности эксплуатации парка, фактор квалификации локомотивных бригад находятся по формулам (6-8):

$$x_{\text{серийность}} = \sum_1^I \omega_i \alpha_i, \quad (6)$$

$$x_{\text{срок эксплуатации}} = \left(\sum_1^N T_n \right) / N, \quad (7)$$

$$x_{\text{квалификации бригад}} = \left(\sum_1^E C_e \right) / E, \quad (8)$$

где ω_i – среднесетевое значение удельного числа отказов локомотивов i -й серии;

α_i – доля суммарного пробега локомотивов всех серий (I) на этой дороге;

T_n – длительность эксплуатации n -го локомотива, лет;

N – численность локомотивов по дороге;

C_e – стаж e -го машиниста;

E – число машинистов в штате дороги [1].

Итоговый показатель Y позволяет сравнивать между собой состояние отдельных локомотивов или парков на основе обобщённой оценки факторов.

Отметим, что метод факторного анализа близок по своему содержанию к методам индексной оценки технического состояния, который также базируется на определении интегральной оценки с учётом влияния частных параметров с помощью весовых коэффициентов [4].

3. Метод Монте-Карло заключается в применении вместо аналитической модели, описывающей систему или процесс, вероятностной модели, достоверность которой аналогична или близка аналитической. При этом вероятностная модель может быть как проще (применяется для облегчения расчёта и использования вместо аналитической), так и сложнее аналитической (применяется для проверки её результатов).

Основные этапы метода – выбор математической модели, связывающей входные и выходные параметры; выбор распределения вероятностей для ключевых параметров модели; проведение имитации значений ключевых параметров модели; расчёт основных характеристик распределения исходных и выходных показателей.

4. Одним из наиболее популярных статистических методов является метод Байеса. Он заключается в определении вероятности диагноза D_i при наличии признака k_j или совокупности признаков $K^*(k_1^*, \dots, k_n^*)$. Для случая с определением вероятности диагноза D_i с простыми признаками k_j формула Байеса примет вид (9)

$$P\left(\frac{D_i}{k_j}\right) = P(D_i) \frac{P\left(\frac{k_j}{D_i}\right)}{P(k_j)}, \quad (9)$$

где $P(D_i) = \frac{N_i}{N}$ – вероятность проявления диагноза D_i ;

N_i – число объектов с диагнозом D_i , N – число всех объектов;

$P(k_j) = \frac{N_j}{N}$ – вероятность проявления признака k_j ;

N_j – число объектов с признаком k_j ;

$P(k_j/D_i) = \frac{N_{ij}}{N_i}$ – вероятность проявления признака k_j у объектов с диагнозом D_i .

В большинстве задач принимают условие независимости признаков [7].

Решающим правилом является $P(D_i/k_j) \geq P_i$; при условии, что P_i – заранее выбранный уровень распознавания для диагноза D_i . Обычно $P_i \geq 0,9$. Также в качестве решающего правила может выступать $P(D_i/k_j) > P(D_c/k_j)$, где вероятность диагноза D_i больше вероятности диагноза D_c при параметре k_j .

Метод Байеса эффективно применяется для оценки технического состояния тех или иных систем, кроме того, часто используется бинарный признак – «нет неисправности» или «есть неисправность» (0 или 1 соответственно для простоты анализа) и их комбинации по различным узлам и подсистемам. При выборе определённого набора критических параметров возможно с заданной степенью точности определять состояние отдельных узлов и систем локомотива.

Частным случаем байесовских методов определения надёжности является метод Вальда – последовательная проверка соответствия параметров локомотива и его оборудования тому или иному состоянию. Его преимуществом является проверка только части параметров и только ограниченное число раз – проверки выполняются до момента подтверждения того или иного состояния объекта [7].

5. Вероятность безотказной работы сложной технической системы может быть определена как произведение вероятностей безотказной работы отдельных подсистем (10)

$$P_c = P_{пс1} \cdot P_{пс2} \cdot \dots \cdot P_{псN}, \quad (10)$$

где $P_{пс1}, P_{пс2}, \dots, P_{псN}$ – вероятность безотказной работы подсистем 1, 2, ..., N [3].

В данном случае определение вероятностей безотказной работы тех или иных подсистем, агрегатов и т.д. является отдельной задачей. Отдельно отметим стандарт ГОСТ Р 27.013-2019, в котором приведен перечень возможных методов расчёта безотказности [8].

6. Весьма популярным инструментом для целей технической диагностики являются нейронные сети. Обычно применяют рекуррентные

или последовательные нейронные сети. Последние используют одно- или многослойные; число нейронов во входном слое обычно определяют числом контролируемых показателей технического объекта, число нейронов в скрытом слое – по теореме Колмогорова в количестве до $(2n + 1)$, где n – число показателей функционирования технического объекта, число нейронов выходного слоя – размерностью вектора ответа о состоянии объекта [9].

7. Марковские процессы характеризуют конечное число состояний технической системы, связанных друг с другом возможными переходами из одного в другое с заданной вероятностью. Марковские цепи используют для управления техническими системами, например, с целью корректировки ТОиР. Часто выделяют три состояния системы: исправное (P_1); неисправное, но работоспособное (P_2); неисправное и неработоспособное (P_3). Схему перехода из одного состояния в другое представим на рисунке 2. Каждый переход из одного состояния в другое характеризуется вероятностью перехода p_{ij} .

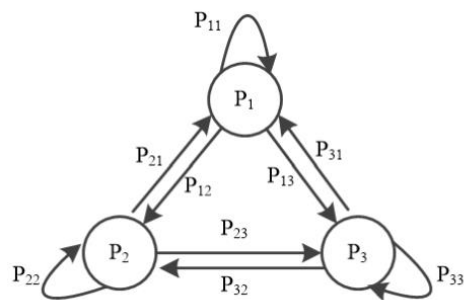


Рисунок 2 – Марковская цепь для трёх состояний (P_1, P_2, P_3) с переходами между ними ($P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{31}, P_{32}, P_{33}$)

Для стационарного марковского процесса (с неизменной вероятностью перехода между состояниями) матрица вероятностей перехода такова (11)

$$P(n) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где n – число переходов между состояниями.

Для марковских цепей первого порядка текущее состояние системы и вероятности перехода не зависят от предыдущих. При нестационарном марковском процессе вероятность перехода вместо $p_{ij} = \text{const}$ представляется в виде $P(n) = p_{ij}(n)$ [10]. В работе [11] с помощью марковской цепи предлагается оценивать вероятность перехода между исправным и неисправным состояниями оборудования локомотива на основе характеризующих его комбинации параметров $X = \{X_1; \dots; X_n\}$. При изменении комбинации параметров изменяется вероятность перехода между состояниями.

8. Методы оценки энергоэффективности позволяют комплексно оценить реализацию локомотивом своего назначения и функционирование его оборудования в целом. Существует большое число методов, в том числе оценка по КПД, по производительности, по экологичности, на основе реостатных испытаний и т.д. В статье [12] авторы на основе существующих методик оценки энергоэффективности предлагают суперкритерий для оценки эффективности тепловозов с точки зрения производительности, КПД, экологичности, затрат на ТОиР и неплановые ремонты по формуле (12)

$$W = \frac{A^2}{BN_{и}T} \cdot \frac{P_{вы}^{эталон}}{P_{вы}^{факт}} \cdot \frac{1}{P_{ут}^{факт}} \cdot \frac{1}{c_{т} + c_{то,тр} + c_{нр}}, \quad (12)$$

где A – работа тепловоза, МДж;

B – фактический расход топлива, кг;

$N_{и}$ – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг;

$P_{вы}^{эталон}$ – вред выхлопных газов, эталонный;

$P_{вы}^{факт}$ – вред выхлопных газов, фактический;

$P_{ут}^{факт}$ – вред утечек ГСМ на путь, фактический;

$c_{т}$ – стоимость топлива, потраченного за время T , руб.;

$c_{то,тр}$ – стоимость ТОиР за время T , руб.;

$c_{нр}$ – стоимость неплановых ремонтов, руб.

Сведём краткий анализ математических моделей для интегральной оценки в таблицу 4.

Для оценки интегрального технического состояния локомотива с целью постановки диспетчером в состав поезда с минимальной вероятностью отказа в движении могут быть использованы как одна из рассматриваемых математических моделей, так и иной вариант на базе их синтеза, применения разработанных на их базе суперкритериев (аналогично примеру в работе [12]), комбинации марковских цепей с байесовскими методами (аналогично [11]), применению агрегированных классификаторов [9] или иных способов.

Выбор предпочтительной модели является целью дальнейшей работы по данному направлению.

Таблица 4 – Краткий анализ математических моделей оценки тех. состояния

Тип модели	Требования к реализации	Недостатки
Факторный анализ	Определение ключевых параметров, весовых коэффициентов	Большая зависимость от выбора корректных факторов
Метод Монте-Карло	Выбор модели, соответствующей фактическому распределению	Точность
Байесовские методы	Выбор критических параметров и анализ всех их возможных комбинаций параметров	Трудоёмкость корректировки созданной модели при учёте новых данных; Недоучёт отдельных маловероятных событий
Вероятностно-статистические модели	Определение безотказной работы отдельных подсистем, узлов, деталей, выбор распределения, сбор статистики	Усредненность показателя применительно к отдельному локомотиву
Нейросетевые модели	Выбор достаточного количества параметров, проектирование сети, обучение сети	Необходима достаточная выборка обучающих данных
Марковские цепи	Разработка перечня состояний, условий перехода	Ограниченность исходными условиями
Оценка энергоэффективности	Сбор реальных эксплуатационных данных по конкретному локомотиву	Укрупнённость оценки без детализации

Список использованных источников

1. Обеспечение эксплуатационной надёжности локомотивов на этапах жизненного цикла. Сб. науч. тр. / под ред. А.Т. Осяева, А.Б. Подшивалова. М.: Интекст, 2006. – 159 с.
2. Бусленко Н.П. Лекции по теории сложных систем. М.: «Советское радио», 1973. – 440 с.
3. Астафьева, Т. Р. Интегральная оценка при контроле технического состояния объекта / Т. Р. Астафьева, Г. Я. Зверев // Автометрия. – 1968. - №4. – С. 24-28.
4. Богомолова, Ю. И. Интегральная оценка технического состояния трансформаторов. Ожидания и реальность / Ю. И. Богомолова, В. М. Левин // Борисовские чтения : Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Красноярск, 25–26 октября 2023 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2024. – С. 35-41. – EDN VPXRLP.
5. ГОСТ Р 57445-2017. Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса [Электронный ресурс]. Техэксперт / URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200145087> (дата обращения: 16.02.2025 г.)
6. Кочерга, В.Г. Надежность тепловозов : учеб. пособие. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2012. – 66 с.: ил.

7. Коньков, А. Ю. Теоретические основы технической диагностики : курс лекций. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2021. – 116 с. : ил.
8. ГОСТ Р 27.013-2019. «Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности» [Электронный ресурс]. База ГОСТ/СП/СНиП / URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/724/72402.pdf> (дата обращения: 26.02.2025)
9. Жуков, Д. А. Разработка моделей, алгоритмов и программ диагностики функционирования технических объектов с использованием агрегированных классификаторов [Текст] : Дис. ... канд. тех. наук: 05.13.18 / Д. А. Жуков – М., 2020. – 133 с.
10. Ховард, Р.А. Динамическое программирование и марковские процессы / Пер. с англ. В.В. Рыкова, под ред. Н.П. Бусленко. М.: Советское радио, 1964. – 189 с.
11. Буйносов, А. П. Развитие функциональных возможностей системы диагностики локомотивов / А. П. Буйносов, Д. Л. Худояров, И. А. Тюшев // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 2. – С. 60-63. – EDN ANAWBQ.
12. Кунат, Р. М. Современные подходы к оценке энергетической эффективности автономных локомотивов / Р. М. Кунат, А. Г. Силюта // Локомотивы. Электрический транспорт - XXI век : материалы IX Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 15–17 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. – 446 с.