

Метод оценки работоспособности тепловозов



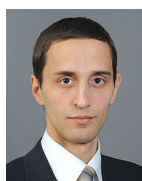
В. В. Грачев,
к.т.н., доцент, кафедра
«Локомотивы и локомотивное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)



А. В. Грищенко,
д.т.н., профессор, кафедра
«Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС



В. А. Кручек,
д.т.н., профессор, кафедра
«Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС



М. Н. Панченко,
инженер, кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ПГУПС

Широкомасштабное внедрение микропроцессорных систем автоматического регулирования помимо повышения качества и эффективности работы тепловозов открыло широкие возможности для использования новых подходов по определению фактического технического состояния отдельных узлов и агрегатов. Накопление значительного объема диагностической информации приводит к необходимости обновления методов ее обработки.

Одна из основных задач любой системы технической диагностики — определение работоспособности тепловоза. Однако оценка его технического состояния в виде утверждений «работоспособен» или «неработоспособен» информативна только для принятия решения о переходе к следующей задаче: поиску возможного дефекта [1].

При выполнении диагностирования узлов и агрегатов тепловоза более привлекательна оценка положений в области работоспособных состояний, т. е. важно знать, насколько эффективно он выполняет задачи по перевозке грузов или пассажиров. По аналогии с системами автоматического регулирования объектов с непрерывными сигналами предлагается использовать понятие «степень работоспособности» [2]. Исследуем возможность применения этого определения и соответствующего математического аппарата для оценки работы отдельных узлов, агрегатов и тепловоза в целом. Однако задача оценки степени работоспособности тепловоза до сих пор не проработана должным образом. Это связано, в первую очередь, с трудностями учета одновременно изменяющегося множества параметрических характеристик технического состояния узлов и агрегатов и оценки их влияния на общее состояние тепловоза.

Наиболее полно исследованы вопросы определения работоспособности в публикациях [3, 4], где рассматривается класс выражений для вычисления работоспособности технических объектов. Под техническим объектом понимается устройство, исправное состояние которого характеризуется совокупностью отдельных параметров.

В данном случае степень работоспособности по отдельным параметрам определяет нормируемые отклонения

от границ области работоспособности согласно выражению

$$q_s = \left[\frac{q_s(t) - q_s^*}{q_{opt} - q_s^*} \right], \quad (1)$$

где $q_s(t) \in [0,1]$ — степень работоспособности по S -му параметру;

q_{opt} — оптимальное значение параметра;

$q_s(t)$ — измеренное значение параметра;

q_s^* — допустимое значение параметра.

При оценке качества работы отдельных узлов и агрегатов, а также тепловоза в целом приходится определять, принадлежат или не принадлежат полученные значения области допустимых отклонений.

Работоспособность тепловоза определяется не только отклонениями значений отдельных параметров, но и их сочетаниями и влиянием друг на друга, поэтому необходимо разработать новый подход к решению задачи по определению степени работоспособности тепловоза с учетом особенностей его эксплуатации и технического обслуживания [5].

Для оценки технического состояния тепловоза при отнесении его к одному из классов: «работоспособен» или «неработоспособен», можно применить элементы теории нечетких множеств. Нечеткая переменная определяется кортежем $\langle x, u, \bar{x} \rangle$, где x — наименование нечеткой переменной; $u = \{x\}$ — область ее определения; $\bar{x} = \bigcup_{x \in u} \{\mu_x, x\}$ — нечеткое множество на u , описывающее ограничения на возможные числовые значения нечеткой переменной x . Тогда функция $\mu_x(x)$ называется функцией принадлежности нечеткому множеству X [6].

При использовании теории нечетких множеств для определения степени работоспособности узлов, агрегатов и тепловоза в целом обычно представляются классы состояния объектов. Любое

состояние в пространстве параметров X описывается функциями принадлежности $\mu_a(x)$ и $\mu_b(x)$, где a и b — ограниченные выпуклые множества работоспособных и неработоспособных состояний соответственно. Отнесение тепловоза к тому или иному классу оценивается по степени разделимости $D=1-M$, где $M=Supmin[\mu_a(x_1, x_2, \dots, x_m), \mu_b(x_1, x_2, \dots, x_m)]$ есть максимальный показатель пересечения нечетких множеств. Задача определения технического состояния узлов, агрегатов и тепловоза в целом сводится к восстановлению разделительной функции такой, что

$$F(t) = \begin{cases} >0, & \text{при } \mu_a(x) > \mu_b(x) \\ =0, & \mu_a(x) = \mu_b(x) \\ <0, & \mu_a(x) < \mu_b(x) \end{cases} \quad (2)$$

Решающее правило исполнения условия отнесения узлов и агрегатов к классу работоспособных (A) или неработоспособных (B) состояний относительно всех параметров будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \mu_a(x) - \mu_b(x) < 0 &\Leftrightarrow x \in B \\ \mu_a(x) - \mu_b(x) > 0 &\Leftrightarrow x \in A \end{aligned} \quad (3)$$

При определении технического состояния предлагается использовать понятие «степень существования неисправности», которое равно минимальному значению, если нет отклонения параметров от номинальных значений, и максимальному значению в случае неисправности.

Степень существования неисправности описывается как $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, где s_i — имя i -й степени существования неисправности. Очевидно, что степень существования неисправности, если она задается на интервале $[0, 1]$, можно связать со степенью работоспособности соотношением $S=1-S$.

Те подходы, где используются элементы теории нечетких множеств, достаточно просты и удобны в случае нечетких исходных данных, к которым относятся описания неисправностей и параметрических отказов тепловозных узлов и агрегатов. При этом следует отметить такие недостатки, как произвольное толкование понятия степени работоспособности и неразработанность аналитических выражений для ее определения.

В настоящей работе предлагается в виде нечеткого множества рассматривать область допустимых отклонений параметров, характеризующих эффективную работу тепловоза. Тогда наименование нечеткой переменной будет соответствовать наименованию исследуемого параметра; область определения — области изменения параметра. Нечетким множеством G_i на множестве изменения параметров будет область допустимых отклонений отдельных параметров g_i с функцией принадлежности $\mu_{G_i}(g_i)$. Функция принадлежности $\mu_{G_i}(g_i)$ характеризует степень принадлежности текущего значения контролируемого параметра области допустимых отклонений или приближения этого значения к границам области либо отклонения от номинального значения.

Для успешного решения поставленной задачи необходимо правильно выбрать вид функции принадлежности $\mu_{G_i}(g_i)$. Параллельное представление функций принадлежности — компактное, обеспечивающее простоту построения их на практике, однако оно связано с исследованием степени адекватности используемых отдельных форм (треугольной, трапецевидной, колоколообразной и т. п.).

Процедура построения функций принадлежности, рассматриваемая в [7], основана на их представлении в виде функции от плотности вероятности четких случайных границ переменных. Если множество A описывается интервалом $[\gamma_1, \gamma_2]$ и параметрами $x > \gamma_1$ и $x < \gamma_2$, то $x \notin A$. Если γ_1 и γ_2 случайные величины, то A — нечеткое множество.

Пусть $f_1(\gamma_1)$ и $f_2(\gamma_2)$ — функции плотности вероятности для нижнего и верхнего порогов значений параметров соответственно. При вероятностной интерпретации функции принадлежности имеем

$$\mu_A(x) = P(x \in A) \quad (4)$$

С учетом введенных обозначений получим

$$\mu_A(x) = P(\gamma_1 < x < \gamma_2) \quad (5)$$

При независимости случайных величин γ_1, γ_2 находим

$$\mu_A(x) = P(x > \gamma_1)P(x < \gamma_2) \quad (6)$$

Обозначим

$$F_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\gamma) d\gamma \quad \text{и} \quad F_2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(\gamma) d\gamma$$

По определению

$$F_1(x) = P(\gamma_1 < x) \quad (7)$$

Тогда окончательно получим

$$\mu_A = F_1(x)[1 - F_2(x)] \quad (8)$$

Таким образом, определять функции принадлежности можно на основе функций распределения F_1 и F_2 с дальнейшим использованием выражений, полученных для $\mu_A(x)$. Функции F_1, F_2 могут быть построены на основе статистических данных по результатам работы тепловозов [8].

При использовании теории нечетких множеств для решения задач по определению степени работоспособности вид функции принадлежности должен учитывать конкретные цели в том или ином случае. Это может быть описание условий работоспособности, модель обнаружения возникающего дефекта, какая-либо трактовка прогнозирования технического состояния или результаты работы тепловоза в конкретных условиях эксплуатации.

Для определения степени работоспособности функция принадлежности параметров области допустимых отклонений должна отвечать следующим требованиям:

- 1) быть ограниченной, так как выход из области допустимых отклонений параметров должен указывать на возникновение отказа в системе;
- 2) быть монотонной, так как каждый перегиб функции принадлежности соответствует изменению скорости протекания постепенных отказов;
- 3) должны учитываться значения каждого параметра для оценки степени работоспособности в целом;
- 4) быть достаточно простой для наглядности и удобной работы.

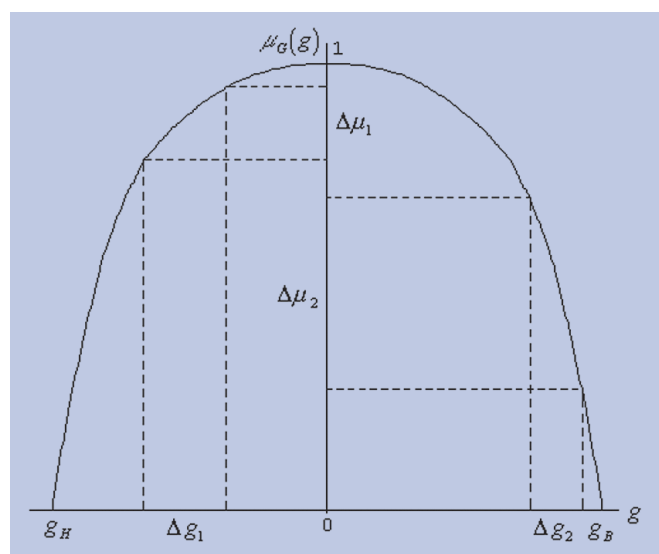


Рис. 1. Влияние значений параметров в области допустимых отклонений на изменение степени принадлежности

На наш взгляд, приведенным требованиям отвечает функция принадлежности, описываемая выражением

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{g^* - g}{E_B}, & g - E_B < g < g^* \\ 1 - \frac{g - g^*}{E_H}, & g^* < g < g^* + E_H \end{cases}, \quad (9)$$

где g^* — номинальное значение параметра; g — текущее значение параметра; $E_B = g_B - g^*$; $E_H = g^* - g_H$. g_H, g_B — соответственно нижнее и верхнее предельное значение отклонения параметра.

В уравнении (9) возможно как двухстороннее задание области допустимых отклонений параметров, так и одностороннее, при котором $E_H = 0$ или $E_B = 0$. Данная функция принадлежности учитывает также положение текущего значения параметра в области допустимых отклонений с учетом следующих положений:

1) малые отклонения параметров вблизи номинальных значений Δg (рис. 1) должны соответствовать малому изменению степени принадлежности параметра области допустимых отклонений $\Delta \mu$;

2) малые изменения параметров вблизи границы области допустимых отклонений g должны соответствовать большому изменению степени принадлежности $\Delta \mu$, так как резко возрастает вероятность выхода параметра за пределы допуска и появления отказа.

Значения показателя γ могут быть определены как обратные величины коэффициента влияния того или иного параметра на оценку степени работоспособности при условии, что коэффициенты влияния принимают значения из интервала [0, 1]. Если коэффициент влияния велик, то значение γ уменьшается и в предельном случае может представлять линейную зависимость при $\gamma = 1$. Случай $\gamma = 1$ соответствует операции растяжения и ведет к увеличению значения степени принадлежности.

Для малых значений коэффициентов влияния величина γ растет, при этом учитываются изменения параметров только у границ области допустимых отклонений. Случай $\gamma > 1$ не рассматривается вследствие ограничений, введенных на функцию принадлежности, а также потому, что коэффициент влияния не может принимать значения больше единицы.

Таким образом, применение данной функции принадлежности параметров области допустимых отклонений координат энергетической установки позволяет характеризовать степень их приближения к границе области и может быть использовано в дальнейшем при определении степени работоспособности тепловоза или его отдельных систем.

Область работоспособности может быть задана как отдельным параметром (удельным расходом топлива, изменением частоты вращения коленчатого вала дизеля, временем переходного процесса, надежностью, наработкой на отказ, временем восстановления и т. п.), так и совокупностью параметров, которая может включать приемистость, коэффициент полезного действия, производительность, экономичность и т. д.

Определение степени работоспособности тепловоза или его узлов по отдельному параметру представляет собой наиболее простой случай. Пусть объект исследования описывается моделью с одним параметром g . Предполагается, что для данного параметра известны область определения, условия работоспособности и номинальные значения. Обозначим верхнюю границу области работоспособности g_{Bi} , нижнюю g_{Hi} , номинальное значение g_{0i} .

Сформулируем требования, которым должна отвечать степень работоспособности объекта по отдельному параметру:

1) степень работоспособности должна принимать значения из интервала [0, 1];

2) максимальное значение, равное единице, степень работоспособности должна принимать при значении параметра, равном номинальному его значению $g_i = g_{0i}$;

3) минимальное значение степени работоспособности, равное нулю, должно соответствовать значению параметра, равному одному из предельных значений, заданных для $g_i = g_{Bi}$ или $g_i = g_{Hi}$;

4) величина степени работоспособности может учитывать степень приближения параметра к границе области работоспособности.

Данным требованиям отвечает функция принадлежности некоторого параметра g_i области работоспособности G_i , заданной в виде $\mu_{G_i}(g_i)$.

Нечеткое множество степени работоспособности запишется в этом случае следующим образом: $S = \{\mu_{G_i}(g_i); g_i\}$.

Возможны четыре варианта расположения результата относительно области работоспособности (рис. 2).

Первый g_{i1} и четвертый g_{i4} варианты соответствуют работоспособному и неработоспособному состояниям и характеризуются отсутствием ошибок в принятом решении. Второй g_{i2} и третий g_{i3} варианты также соответствуют работоспособному и неработоспособному состояниям, но в случае погрешности измерений.

При определении технического состояния тепловоза по совокупности параметров можно утверждать, что степень работоспособности определяется функциональной зависимостью

$$S = f[G_i, \mu_{G_i}(g_i), v_i], \quad (10)$$

где $G = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_n\}$ — вектор параметров, для которых заданы условия работы в виде замкнутого интервала $[g_{Hi}, g_{Bi}]$;

μ_{G_i} — функция принадлежности текущего значения параметра g_i области допустимых значений;

v_i — коэффициенты значимости параметров g_i для оценки степени работоспособности в целом.

При построении зависимости степени работоспособности от функций принадлежности возможны несколько подходов. Один из подходов основывается на нечеткой конъюнкции функции по отдельному параметру [9]. Зафиксируем значения всех параметров, от которых зависит уровень степени работоспособности тепловоза или его отдельных узлов, кроме некоторого i -го, на значениях $G_1 = H_{N1}, \dots, G_{i-1} = H_{i-1}, G_{i+1} = H_{i+1}, \dots, G_m = H_m$, где H_i — граничное значение рассматриваемого параметра.

Выражение для степени работоспособности представляет собой зависимость степени работоспособности от одного параметра $S = \phi(G_i |_{G_i=H_i})$

Определение степени работоспособности в этом случае аналогично определению ее по отдельному параметру. Тогда реализуется линейная зависимость значения степени работоспособности от значений функции принадлежности $\mu_{G_i}(g_i)$.

Каждое значение параметров однозначно характеризуется своей функцией принадлежности $\mu_{G_i}(g_i)$, и степень работоспособности определяется в форме нечеткой конъюнкции функций принадлежности отдельных параметров: $S = \min\{\mu_{G_i}(g_i)\}$.

К сожалению, это выражение не полностью отражает реальное техническое состояние узлов тепловоза и формирование работоспособности: пока не до конца изучен механизм взаимного влияния параметров друг на друга. Практически техническое состояние тепловоза определяется n -параметрами, по которым можно судить об его эффективности, и необходимо говорить о большей степени работоспособности, чем о минимальном значении функции принадлежности.

Сформулируем определение, которое можно дать понятию «степень работоспособности» тепловоза. Это абстрактная величина, выражающая в числовом виде его техническое состояние и характеризующая изменение последнего в зависимости от отклонения величин, принятых в качестве основных параметров. Согласно приведенному определению сформулируем требования (ограничения), которым должна соответствовать функциональная зависимость изменения технического состояния, а следовательно, и степень работоспособности, от изменения параметров:

1) непрерывность $S = \Phi(G_1, G_2, \dots, G_m)$; требование основывается на том, что степень работоспособности может быть определена для объекта, параметры которого изменяются медленно и непрерывно по сравнению с рабочими процессами в дизеле или электропередаче; очевидно, что если изменять какие-либо параметры дискретно относительно его положения в области работоспособности и нерабочего состояния, то не имеет смысла говорить о степени работоспособности;

2) достижение одним или несколькими параметрами граничных значений в области допустимых значений или выход за ее пределы; обозначим их величины H_{i_j} с функцией принадлежности $\mu_{om}(g_i) = 0$; при этом считается, что в объекте возникает отказ, и по определению степень работоспособности принимает значение, равное нулю; тогда можно записать для граничных точек $a_{oi} = \begin{cases} \text{Если } G_1 = H_{1, \dots}, G_i = H_{i, \dots}, G_m = H_m, \text{ то } S = 0 \end{cases}$; если хотя бы одна $G_i = H_{i_j}$, это значит, что тепловоз неработоспособен;

3) равенство всех параметров номинальным значениям определяет номинальное техническое состояние и, следовательно, равенство степени работоспособности единице $\forall i \ g_i = H_{Ni}$ при $\mu_{Ni}(g_i) = 1$.

Равенство параметров промежуточным значениям определяет промежуточные (в диапазоне от 0 до 1) значения степени работоспособности и должно быть средней величиной функции принадлежности $\mu_{Gi}(g_i)$.

Каждый из параметров должен нормироваться в зависимости от влияния его изменения на показатели степени работоспособности. Такая нормировка может быть введена в функцию принадлежности значения параметра области его допустимых отклонений, что рассмотрено раньше.

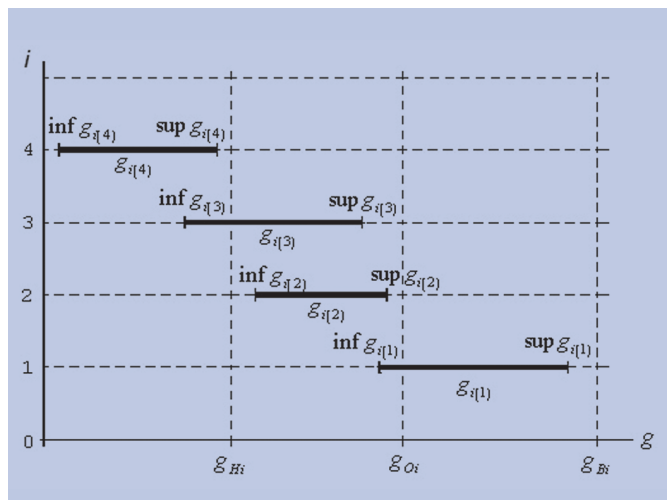


Рис. 2. Возможные положения диагностического параметра в области допустимых отклонений

При использовании более двух параметров степень работоспособности представляет собой гиперповерхность, ограниченную функциями принадлежности каждого из параметров.

Таким образом, в функциональной зависимости степени работоспособности от совокупности параметров, имеющей нелинейный характер, учитываются ограничения, накладываемые на понятие степени работоспособности. При одновременном изменении совокупности параметров учитывается положение текущего значения каждого из них.

Численные значения степени работоспособности характеризуют текущее техническое состояние тепловоза и могут использоваться при решении задач прогнозирования эффективности его дальнейшей работы.

В заключение подчеркнем следующее. Согласно предлагаемой методике определения степени работоспособности тепловозов область допустимых отклонений параметров может быть представлена как нечеткое множество на множестве их возможных изменений. В качестве оценки отклонения параметров от номинальных значений используется функция принадлежности нечеткому множеству. Выбрана функция принадлежности, отражающая малые вариации параметров вблизи номинального значения и вблизи границы области работоспособности с учетом коэффициентов значимости параметров, ограниченных их наибольшим и наименьшим значениями. При помощи предложенного метода можно определить уровень работоспособности тепловозов и их отдельных узлов. ■

Литература

1. Грачев В. В., Грищенко А. В., Лавский В. Г. Система непрерывного удаленного контроля параметров локомотива // Матер. Третьего межд. симп. «Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте. СПб.: ПГУПС, 2007. С. 535–539.
2. Здор А. П. Определение уровней контроля работоспособности автоматической системы регулирования генератора // Исследование надежности и экономичности дизельного подвижного состава. — Омск: ОмИИТ, 1998. С. 7–12.
3. Гаскаров Д. В., Айрапетян А. М. Количественная оценка работоспособности многомерных объектов // Методы и средства технической диагностики. В 2 кн. Кн. 1. — Ивано-Франковск: Облполиграфиздат, 1990. С. 62–66.
4. Вознюк С. Н., Ставров Т. В. Управление надежностью тепловозов // Надежность тепловозов и путевых машин: Труды ВНИТИ. Вып. 70. — Коломна, 1989. С. 3–10.
5. Грищенко А. В., Грачев В. В., Кручек В. А. и др. Повышение эффективности технического обслуживания локомотивов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. 2012. № 4 (33). С. 93–97.
6. Крамер Ю. А. Алгоритм оценки степени работоспособности сложных систем // Обеспечение надежности и качества технических систем методами диагностики. — Челябинск: УДНТП, 1995. С. 29–36.
7. Алексеев А. В. Интерпретация и определение функции принадлежности нечетких множеств // Методы и системы принятия решений. — Рига: РТИ, 1979. С. 42–50.
8. Грачев В. В., Грищенко А. В., Базилевский Ф. Ю. О достоверности прямых способов оперативного контроля энергоэффективности тепловозов в эксплуатации // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий Техн. жел. дорог. 2018. № 2 (42). С. 40–48.
9. Заковряшин А. И. Построение функции принадлежности параметров радиоэлектронной аппаратуры по экспериментальным данным // Труды МАИ. 2017. Вып. 95. С. 123–137.