

УДК 001.891.5:629.463-592

Ю.Я. Водяников, Т.В. Шелейко, С.М. Свистун, В.Г. Микадзе

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА ПРИ ПОЕЗДНЫХ ТОРМОЗНЫХ ИСПЫТАНИЯХ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ТОРМОЖЕНИЙ

Предложена методика оценки тормозной эффективности единиц подвижного состава при проведении поездных тормозных испытаний методом последовательных торможений. Методика базируется на основных положениях оценивания точности результатов количественным выражением неопределенности измерений. Предложены расчетные зависимости и алгоритм оценивания рассеивания определяемой величины при доверительной вероятности 0,95.

Одним из важнейших факторов для обеспечения безопасности движения поездов являются надежность и эффективность тормозных систем подвижного состава.

К тормозным системам вагонов предъявляются повышенные требования, а их характеристики регламентируются нормативными документами и инструкциями по ремонту и эксплуатации. Наиболее достоверная информация об эффективности тормозной системы грузового вагона может быть получена в результате проведения поездных тормозных испытаний.

В практике экспериментальных исследований тормозной эффективности вагонов получили распространение такие методы испытаний как:

1. Торможение всего опытного сцепа тормозными средствами только испытуемого вагона без его отцепки. Из этих опытов определяют тормозной путь сцепа при различных скоростях движения. Порядок дальнейшего определения тормозных характеристик испытуемого вагона зависит от соотношения его веса и веса остальной части сцепа. Недостатком такого метода является получение коэффициента тормозного нажатия малой величины, что затрудняет пользование номограммами расчетных тормозных путей;

2. Последовательное торможение двух сцепов. Согласно этому методу, тормозным испытаниям вначале подвергается сцеп, сформированный из локомотива, вагона-лаборатории и одного или нескольких испытуемых вагонов, а затем сцеп, из которого исключен один из испытуемых вагонов. По полученным тормозным путям определяются тормозные коэффициенты обоих сцепов, на основании которых определяется коэффициент тормозного нажатия опытного вагона;

3. Более точным по сравнению с предыдущими методами является измерение тормозного пути опытного вагона методом «бросания», при котором разогнанный до заданной скорости вагон автоматически отцепляется от опытного сцепа в момент начала торможения, в то время как сцеп уходит вперед. Тормозной путь определяется как разность путей сцепа от точки расцепки до его остановки и обратно до возвращения к испытуемому вагону.

© *Водяников Ю.Я., Шелейко Т.В., Свистун С.М., Микадзе В.Г. 2010*

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Метод «бросания» имеет ряд специфических особенностей и требует обязательного закрытия для движения всего участка, на котором происходит торможение, так как после расцепы испытуемый вагон движется самостоятельно, без управления, под действием только своего тормоза. При этом необходимо, чтобы вагон-лаборатория был оборудован устройством саморасцепы и автоматического перекрытия концевого крана тормозной магистрали вагона-лаборатории со стороны опытного вагона.

Как правило, такие испытания требуют специального полигона, имеющего прямой участок пути с площадкой или уклоном не более 1 ‰ , протяженностью не менее 10 км и допустимой скоростью движения до 160 км/ч включительно. При отсутствии специального полигона, тормозные поездные испытания могут проводиться на действующих участках железных дорог при условии соответствия их указанным требованиям.

Вместе с тем, метод «бросания», из-за отсутствия полигона, не всегда может быть реализован на действующих путях. В этом случае используется метод последовательных торможений.

Для проведения поездных тормозных испытаний методом последовательных торможений формируется опытный поезд в составе вагона-лаборатории, локомотива одного или нескольких вагонов, один из которых является опытным (рис. 1).

Экспериментальные значения расчетного коэффициента силы нажатия тормозных колодок $\delta_o(V_i)$ опытного вагона в исследуемом диапазоне скоростей определяются по формуле [1]:

$$d_o(V_i) = d_{c1}(V_i) + \frac{A}{Q_2} \cdot (d_{c1}(V_i) - d_{c2}(V_i)) \quad (1)$$

где $\delta_{c1}(V_i)$ – расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок опытного поезда с опытным вагоном в пересчете на грузовой поезд при i -ой скорости;

$\delta_{c2}(V_i)$ – расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок опытного поезда без опытного вагона в пересчете на грузовой поезд при i -ой скорости;

Q_1 – вес опытного поезда без опытного вагона, тс;

Q_2 – вес опытного вагона порожнего или груженого, тс.

В методе последовательных торможений актуальное значение приобретают вопросы, связанные с оценкой тормозной эффективности опытного вагона.

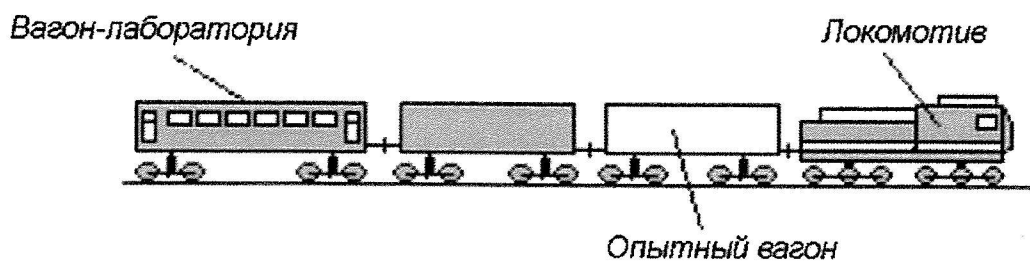


Рис. 1. Опытный поезд для проведения поездных тормозных испытаний

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Такая оценка может быть получена на основе метода для выражения и оценивания неопределенности измерений, поэтому для оценки неопределенности измерения расчетного коэффициента силы нажатия тормозных колодок опытного вагона использовалась методика [2], которая базируется на следующих основных положениях:

Неопределенность измерения – параметр, связанный с результатами измерений и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть приписаны измеряемой величине;

Стандартная неопределенность (u) – неопределенность результата измерений, выраженная в виде среднеквадратического отклонения (СКО);

Суммарная неопределенность (u_c) – стандартная неопределенность результата измерений, полученного через значение других величин, равная положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин;

Расширенная неопределенность – величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого, как можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли бы быть приписаны измеренной величине.

Базовый алгоритм расчета неопределенности измерений должен содержать в себе следующие операции:

- составление модельного уравнения;
- оценивание входных величин, внесение исправлений на известные систематические ошибки в результате измерений;
- вычисление оценки результата измерений;
- определение стандартных неопределенностей входных величин;
- определение коэффициентов чувствительности;
- вычисление неопределенности каждой входной величины;
- определение попарной корреляции входных величин (при необходимости);
- вычисление суммарной стандартной неопределенности величины, которую измеряют;
- вычисление коэффициента покрытия;
- вычисление расширенной неопределенности.

Модельное уравнение выражает зависимость между измеряемой величиной Y и входными величинами X_1, \dots, X_m :

$$Y = f(X_1, \dots, X_m) \quad (2)$$

где (X_1, \dots, X_m) – входные величины (непосредственно измеряемые или другие величины, влияющие на результат измерения);

m – число этих величин;

f – вид функциональной зависимости.

Коэффициенты чувствительности (c_i) показывают, каким образом оценка исходной величины y изменяется с изменением оценок входных величин x_1, \dots, x_m . Их находят как частные производные исходной величины по каждой из входных величин (2):

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \Big|_{X_1, X_2, \dots, X_m} \quad (3)$$

При отсутствии корреляции между входными величинами суммарная неопределенность исходной величины определяется как:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} = \sqrt{c_1^2 \cdot u^2(x_1) + c_2^2 \cdot u^2(x_2) + \dots + c_m^2 \cdot u^2(x_m)} \quad (4)$$

где c_i – коэффициенты чувствительности.

Коэффициент покрытия определяется как коэффициент из распределения Стьюдента для уровня доверия 0,95 и эффективного числа степеней свободы v_{eff} , определяемого по формуле Велча-Сатерсвейта [2]:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{u^4(x_i)}{v_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^4} \quad (5)$$

где v_i – эффективное число степеней свободы x_i входной величины.

Расширенную неопределенность получают путем умножения суммарной стандартной неопределенности исходной величины на коэффициент покрытия [2]:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (6)$$

Наиболее распространенный способ формализации неполного знания о значении величины заключается в постулировании равномерного закона распределения возможных значений этой величины в указанных (нижней и верхней) границах, при чем стандартная неопределенность, вычисляемая без применения статистического анализа определяется при симметричных границах по формуле [2]:

$$u(x_i) = \frac{\Delta_i}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Для решения поставленной задачи в качестве модельного используется уравнения (1), погрешность измерения $\Delta \delta_e$ определяется как частные производные по каждой входной величине:

$$\begin{aligned} \Delta d_e = \Delta d_{c1} + \frac{Q_1}{Q_2} \cdot (\Delta d_{c1} - \Delta d_{c2}) + \\ + \frac{1}{Q_2} \cdot (d_{c1} - d_{c2}) \cdot \Delta Q_1 + \frac{Q_1}{Q_2} \cdot (d_{c1} - d_{c2}) \cdot \Delta Q_2 \end{aligned} \quad (8)$$

где δ_{c1} и $\Delta \delta_{c1}$ – соответственно расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок опытного поезда в пересчете на грузовой поезд с испытываемым вагоном-цистерной и погрешность его измерения;

δ_{c2} и $\Delta \delta_{c2}$ – соответственно расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок опытного поезда в пересчете на грузовой поезд без вагона-цистерны и погрешность его измерения;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Q_1 и ΔQ_1 – соответственно вес опытного поезда без опытного вагона и погрешность его измерения, тс;

Q_2 и ΔQ_2 – соответственно вес порожнего или груженого опытного вагона и погрешность его измерения, тс.

Погрешность измерения каждого из тормозных коэффициентов δ_{cl} и $\Delta\delta_{cl}$ определяется с использованием модельного уравнения, выражающего аналитическую зависимость расчетного коэффициента от скорости в начале торможения V и тормозного пути S :

$$\delta(V) = c(V) \cdot S(V)^{d(V)} \quad (9)$$

где $c(V)$ и $d(V)$ – коэффициенты уравнения;

$S(V)$ – тормозной путь, м.

Погрешность измерения расчетного коэффициента силы нажатия композиционных колодок $\Delta\delta(V)$, с учетом модельного уравнения (9), определяется по формуле:

$$\Delta\delta(V) = -d(V) \cdot c(V) \cdot S(V)^{-d(V)-1} \cdot \sum \Delta_i(V); \quad (10)$$

где $d(V) \cdot c(V) \cdot S(V)^{-d(V)-1}$ – коэффициент чувствительности;

$\Delta_i(V)$ – погрешность i -ой составляющей при измерении тормозного пути, м.

Погрешность измерения тормозного пути Δi состоит из двух составляющих Δ_1 и Δ_2 :

Δ_1 – погрешность, обусловленная ошибкой измерения длины тормозного пути;

Δ_2 – погрешность, обусловленная аппроксимацией результатов измерений тормозного пути S и скорости V поезда аналитической зависимостью, при этом стандартная неопределенность определяется по формуле:

$$u_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - (a \cdot V_i^2 + b \cdot V_i))^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (11)$$

где a и b – коэффициенты уравнения, выражающего аналитическую зависимость тормозного пути порожнего и груженого вагона на площадке от скорости движения в начале торможения;

n – число торможений в исследуемом диапазоне скоростей;

S_i – i -ое значение тормозного пути, соответствующее V_i скорости в начале торможения.

Погрешность взвешивания опытного вагона обуславливается классом точности вагонных весов и погрешностью меньшего разряда шкалы измерения.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты расчета неопределенности измерений тормозного коэффициента (расчетного коэффициента силы нажатия композиционных колодок) для вагона-цистерны.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Таблиця 1. Расчет неопределенности измерений расчетного коэффициента силы нажатия композиционных колодок для груженого вагона-цистерны и скорости 70 км/ч

Входная величина	Оценка входной величины	Стандартная неопределенность	Число степеней свободы	Распределение вероятностей входной величины	Коэффициент чувствительности	Доля неопределенности
1	2	3	4	5	6	7
Неопределенность измерения пути, обусловленная измерением скорости	$V = 19,44$ м/с (70 км/ч)	$u_v = \frac{\Delta_v}{\sqrt{3}} = 0,08$	∞	равномерный	25,9	2,072
Неопределенность измерения пути, обусловленная измерением времени	$T = 51,8$ с	$u_t = \frac{\Delta_t}{\sqrt{3}} = 0,0029$	∞	равномерный	9,72	0,0282
Неопределенность измерения пути, обусловленная построением графика	503,62 м	$u_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - (a \cdot V_i^2 + b \cdot V_i))^2}{n \cdot (n-1)}} = 20,49$	∞	равномерный	1	20,4892
Неопределенность измерения расчетного коэффициента силы нажатия опытного поезда с груженым вагоном-цистерной		$u_\delta = d \cdot c \cdot s^{-d-1} \cdot \sum u_i^2$	∞	равномерный	0,00056	0,01158

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Для опытного поезда без вагона-цистерны						
Неопределенность измерения пути, обусловленная измерением скорости	V = 19,44 м/с (70 км/ч)	$u_V = \frac{\Delta_V}{\sqrt{3}} = 0,08$	∞	равномерный	25,2509	2,0201
Неопределенность измерения пути, обусловленная измерением времени	T = 50,5 с	$u_t = \frac{\Delta_t}{\sqrt{3}} = 0,0029$	∞	равномерный	9,72222	0,0282
Неопределенность измерения пути, обусловленная построением графика	490,99 м	$u_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - (a \cdot V_i^2 + b \cdot V_i))^2}{n \cdot (n-1)}} = 16,41$	∞	равномерный	1	16,409
Неопределенность измерения расчетного коэффициента силы нажатия для опытного поезда без вагона-цистерны		$u_d = d \cdot c \cdot S^{-d-1} \cdot \sum u_i^2$	∞	равномерный	0,0006	0,00991
Неопределенность измерения весовых характеристик опытного поезда						
Неопределенность измерения веса поезда без вагона-цистерны, обусловленная классом точности вагонных весов	146 тс	$u_{Q1} = \frac{0,5}{100 \cdot \sqrt{3}} = 0,00289$	∞	равномерный	146	0,7308
Неопределенность измерения веса поезда без вагона-цистерны, обусловленная ценой деления шкалы	тс	$u_{Q2} = \frac{10}{1000 \cdot 2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00289$	∞	равномерный	1	0,005
Суммарное значение неопределенности измерения веса поезда	тс	$u_{Q_n} = \sqrt{u_{Q1}^2 + u_{Q2}^2}$	∞	равномерный		0,7308
Неопределенность измерения весовых характеристик груженого вагона-цистерны						
Неопределенность измерения веса груженого вагона-цистерны, обусловленная классом точности вагонных весов	92,71 тс	$u_{Q1} = \frac{0,5}{100 \cdot \sqrt{3}} = 0,00289$	∞	равномерный	92,71	0,2679

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

1	2	3	4	5	6	7
Неопределенность измерения веса груженого вагона-цистерны, обусловленная ценой деления шкалы	тс	$u_{Q2} = \frac{10}{1000 \cdot 2 \cdot \sqrt{3}} = 0,00289$	∞	равномерный	1	0,00289
Суммарное значение неопределенности измерения веса вагона-цистерны	тс	$u_{Q_n} = \sqrt{u_{Q1}^2 + u_{Q2}^2}$	∞	равномерный		0,2679

Конец табл. 1

Таблица 2. Расчет неопределенности измерения коэффициента силы тормозного нажатия для груженого вагона-цистерны с использованием формулы:

$$\Delta d_s = \Delta d_{c1} + \frac{Q_1}{Q_2} \cdot (\Delta d_{c1} - \Delta d_{c2}) + \frac{1}{Q_2} \cdot (d_{c1} - d_{c2}) \cdot \Delta Q_1 + \frac{Q_1}{Q_2^2} \cdot (d_{c1} - d_{c2}) \cdot \Delta Q_2$$

Входная величина	Оценка входной величины	Стандартная неопределенность	Число степеней свободы	Распределение вероятностей входной величины	Коэффициент чувствительности	Доля неопределенности
	$u_{\delta_{c1}}$	$u_{\delta_{c1}} = 0,011578$	∞	равномерный	1	0,01158
		$u_{\delta_{c1}} - u_{\delta_{c2}} = -0,00167$	∞	равномерный	$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{243}{90} = 1,57$	-0,00263
		$u_{Q_n} = 0,73084$	∞	равномерный	$\frac{1}{Q_2} \cdot (d_{c1} - d_{c2})_1 = -7,8E - 0,5$	-5,8E-0,5
		$u_{Q_{n2}} = 0,267947$	∞	равномерный	$\frac{Q_1}{Q_2^2} \cdot (d_{c1} - d_{c2}) = -0,00012$	-3,3E-0,5
Исходная величина	Оценка исходной величины	Суммарная неопределенность	Эффективное число степеней свободы	Уровень доверия	Коэффициент покрытия	Расширенная неопределенность
δ_s <small>(V=70 км/ч)</small>	0,175	0,011874	∞	равномерный	2	0,0237

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Выполненные исследования показали, что наибольшая погрешность определения тормозного коэффициента при проведении поездных испытаний методом последовательных торможений имеет место при скоростях в начале торможения до 60 км/ч (рис. 2).

Предложенная методика позволяет оценивать результаты тормозных поездных испытаний методом последовательных торможений с учетом рассеивания определяемой величины с доверительной вероятностью 0,95.

Исследования показали, что максимальная величина рассеивания определяемой величины для данного метода испытания приходится на небольшие (до 50 км/ч) скорости в начале торможения.

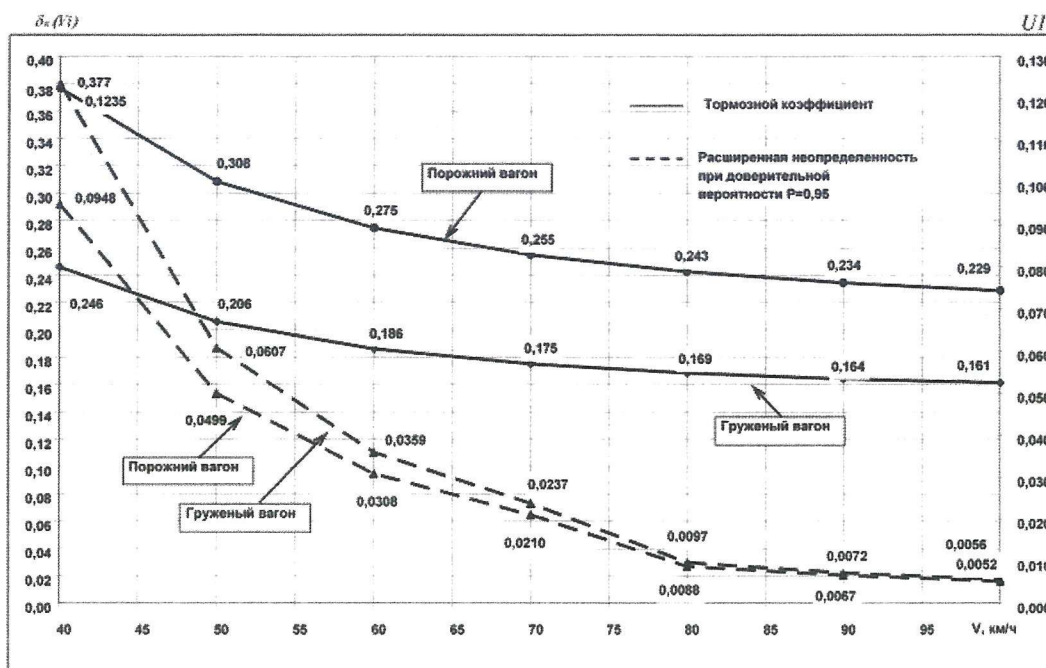


Рис. 2. Тормозные коэффициенты вагона-цистерны, полученные методом последовательных торможений

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмина Э.Н., Морозов А.М. Методика экспериментального определения тормозных характеристик вагонов. - Вестник ВНИИЖТ, 1975, №3 с. 17-23.
2. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 2001 г.