



Силы трения фрикционного клинового гасителя колебаний



Петр АНИСИМОВ

Petr S. ANISIMOV

Исследование сил трения фрикционного клинового гасителя колебаний грузового вагона в динамике. Аналитический способ, корреляционный анализ, авторские подходы, сочетающие теоретические, эмпирические методы, формулы математической статистики.

Ключевые слова: грузовый вагон, железная дорога, силы трения, фрикционный клиновый гаситель колебаний, исследование динамических сил, теория, эмпирика, корреляционный анализ.

Анисимов Пётр Степанович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

При теоретических исследованиях колебаний грузовых вагонов с фрикционными клиновыми гасителями колебаний часто принимается, что создаваемая ими сила сухого трения в динамике по величине такая же, как и в статике при всех скоростях движения и при всех динамических вертикальных и поперечных горизонтальных силах. Предполагалось априори, что сила трения гасителей колебаний может даже уменьшаться вследствие срыва поверхностей трения фрикционного клина и фрикционной планки.

Изучение сил трения гасителя колебаний в динамике аналитическим способом очень трудоёмко и имеет большие погрешности из-за того, что они имеют статистический (случайный) характер изменения при различных скоростях движения и динамических силах на железнодорожном пути со случайными неровностями. Поэтому для исследования закономерностей изменения сил трения гасителя колебаний в динамике мною предложено специальное устройство [1] с тензометрическими датчиками сопротивления, защищённое авторским свидетельством.

Для установления корреляционных зависимостей сил трения гасителя колебаний в вертикальном и поперечном горизонтальном направлениях от динамических вертикальных сил, действующих на рессорный комплект, и от поперечных горизонтальных сил, действующих на боковую раму тележки, были использованы методы корреляционного анализа [2]. Теснота корреляционной связи между силами трения и динамическими силами определялась коэффициентом корреляции r .

$$r = \frac{n \sum PF - \sum P \sum F}{\sqrt{n \sum P^2 - (\sum P)^2} \sqrt{n \sum F^2 - (\sum F)^2}},$$

где n – количество опытных данных выборки случайных величин,

P – динамическая сила,

F – сила трения гасителя колебаний.

Чем ближе значение коэффициента корреляции к единице, тем теснее связь между случайными величинами силы трения и динамической силы. Для утверждения о существовании тесной корреляционной связи между силами трения и динамическими силами использовано известное в математической статистике неравенство:

$$\frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \leq t_{0,025}(n-2), \quad (2)$$

где $t_{0,025}(n-2) = 2,5\%$ – точка распределения Стьюдента с $(n-2)$ степенями свободы, которая табулирована [3].

Доверительные границы коэффициента корреляции при общей совокупности значений сил трения гасителя и динамических сил, исходя из 95% доверительности, определены с использованием преобразования Фишера [4], согласно которому должно быть найдено для общей совокупности значений двух случайных величин такое значение z , чтобы имело место неравенство:

$$z - \hat{z} < 1,96 \sqrt{\frac{1}{n-3}}. \quad (3)$$

Следовательно, значение z находится в интервале:

$$z - 1,96 \sqrt{\frac{1}{n-3}} < \hat{z} < z + 1,96 \sqrt{\frac{1}{n-3}}. \quad (4)$$

Значения z при различных значениях коэффициента корреляции табулированы [3].

Построению подлежат эмпирическая и теоретическая линии регрессии. Характер эмпирической указывает на то, что её можно аппроксимировать двумя прямыми на участке $1,25 \leq P \leq 5,75$ тс и на участке $5,76 \leq P \leq 10,25$ тс. Зависимость для каждой теоретической линии регрессии имеет вид:

$$F = a + bP,$$

где P – вертикальная динамическая сила, действующая на рессорный комплект вследствие колебаний кузова вагона с грузом,

F – сила трения гасителя колебаний в вертикальной плоскости.

Для определения коэффициентов a и b составлена система нормальных уравнений:

$$\sum_{i=1}^n F = na + b \sum_{i=1}^n P; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n FP = a \sum_{i=1}^n P + \sum_{i=1}^n P^2.$$

После решения этой системы уравнения получены следующие корреляционные зависимости между силой трения и вертикальной динамической силой:

$F = 0,53 + 0,574P$ тс для диапазона сил $1,25 \leq P \leq 5,75$ тс;

$F = 2,73 + 0,144P$ тс для диапазона сил $5,76 \leq P \leq 10,25$ тс.

Коэффициент корреляции для первой корреляционной зависимости равен 0,821, а для второй – 0,302. Следовательно, в первой корреляционной зависимости существует достаточно тесная связь между силой трения и динамической вертикальной силой, так как неравенство (2) имеет числовое выражение $49,3 > 1,96$. В этом случае силы трения гасителя колебаний в вертикальной плоскости зависят в основном от вертикальных динамических сил.

Малый коэффициент корреляции (0,302) и неравенство $3,02 > 1,99$ для второй корреляционной зависимости указывают на слабую связь между силами трения в вертикальной плоскости и вертикальными динамическими силами.





Значит, сила трения гасителя колебаний в этом случае слабо зависит от динамических сил, а зависит от каких-то других факторов, которые пока являются неизвестными и требуют дополнительных исследований.

Коэффициент корреляции r лежит в 95%-ных доверительных границах:

$0,766 \leq r \leq 0,836$ для $1,25 \leq P \leq 5,75$ тс и $0,168 \leq r \leq 0,422$ для $5,76 \leq P \leq 10,25$ тс. Следовательно, значения коэффициента корреляции, определённые с учётом доверительных границ, также указывают на то, что в интервале $P = 1,25 - 5,75$ тс величина силы трения гасителя колебаний в вертикальном направлении в основном зависит от динамических вертикальных сил, а в интервале $P = 5,76 - 10,25$ тс величина силы трения гасителя колебаний в вертикальной плоскости практически не зависит от динамических вертикальных сил, а зависит от каких-то других пока неизвестных факторов.

При воздействии на гаситель колебаний поперечных горизонтальных (рамных) сил опять же показательны эмпирическая и теоретическая линии регрессии. Характер изменения эмпирической линии регрессии предполагает, что её можно аппроксимировать прямой теоретической линией регрессии вида $F = a + bH$, где F — сила трения гасителя колебаний в поперечной горизонтальной плоскости, H — поперечная горизонтальная сила. Для определения коэффициентов a и b составляется система нормальных уравнений вида:

$$\sum_{i=1}^n F = an + b \sum_{i=1}^n H ;$$

$$\sum_{i=1}^n FH = a \sum_{i=1}^n H + b \sum_{i=1}^n H^2 .$$

После решения этой системы уравнений получена корреляционная зависимость силы трения гасителя колебаний в поперечной горизонтальной плоскости от поперечной горизонтальной (рамной) силы, действующей от колёсных пар на раму тележки:

$F = 0,27 + 0,129 H$, тс для интервала $0,1 \leq H \leq 4,0$ тс.

Выявленный коэффициент корреляции $r = 0,667$, указывает на то, что связь

между силой трения F в поперечной горизонтальной плоскости и поперечной горизонтальной силой H существует достаточно тесная, так как неравенство (2) получено в числовом выражении: $28,9 > 1,96$. Коэффициент корреляции r , который был определён по той же методике, что и для корреляционной зависимости силы трения гасителя колебаний в вертикальной плоскости, лежит в 95%-ных доверительных границах ($0,635 \leq r \leq 0,701$). Эти границы меньше доверительных границ коэффициента корреляции для зависимости сил трения гасителя колебаний в вертикальной плоскости от вертикальных динамических сил, что даёт основание считать: на величину силы трения в поперечной горизонтальной плоскости оказывают влияние и другие факторы, которые необходимо исследовать дополнительно.

На практике обычно принято силу трения гасителя колебаний в вертикальной плоскости оценивать коэффициентом относительной силы трения, представляющим собою отношение силы трения гасителя колебаний к вертикальной нагрузке на рессорный комплект, а вертикальную динамическую нагрузку — коэффициентом динамической добавки вертикальных сил. Поэтому представляет большой интерес установление корреляционной зависимости между ними.

Эмпирическую линию регрессии можно аппроксимировать теоретической линией в виде квадратической параболы: $\phi = a + bk_d + ck_d^2$, где k_d — коэффициент динамической добавки вертикальных сил (отношение динамической силы к статической), ϕ — коэффициент относительной силы трения гасителя колебаний.

Для нахождения коэффициентов a , b и c методом наименьших квадратов составлена система нормальных алгебраических уравнений:

$$\sum_{i=1}^n \phi_i = na + b \sum_{i=1}^n k_{di} + c \sum_{i=1}^n k_{di}^2$$

$$\sum_{i=1}^n \phi_i k_{di} = a \sum_{i=1}^n k_{di} + b \sum_{i=1}^n k_{di}^2 + c \sum_{i=1}^n k_{di}^3$$

$$\sum_{i=1}^n \phi_i k_{di}^2 = a \sum_{i=1}^n k_{di}^2 + b \sum_{i=1}^n k_{di}^3 + c \sum_{i=1}^n k_{di}^4.$$

После решения этой системы уравнений получается корреляционная зависимость между коэффициентом относительной силы трения и коэффициентом динамической добавки вертикальных сил:

$$\phi = 0,024 + 0,58 k_d - 0,79 k_d^2 \text{ для диапазона } 0,07 \leq k_d \leq 0,7.$$

Для установления тесноты связи между ϕ и k_d определяется корреляционное отношение η_T [2]:

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\delta_i^2}{\sigma^2}} = 0,71,$$

где δ_i^2 – дисперсия частных средних величин,

σ^2 – общая дисперсия.

Средняя квадратическая ошибка корреляционного отношения η_T равна:

$$\sigma_{\eta_T} = \frac{1 - \eta_o^2}{\sqrt{n}}, \quad \eta_o = \sqrt{1 - (1 - \eta_T^2) \frac{n-1}{n-k}},$$

где n – количество опытных данных выборки,

k – число классов, на которое разбиты опытные данные.

При $n = 1380$ и $k = 12$ $\sigma_{\eta_T} = 0,0134$.

Следовательно, корреляционное отношение η_T находится в доверительных границах:

$$0,71 - \sigma_{\eta_T} \leq \eta_T \leq 0,71 + \sigma_{\eta_T} \text{ или}$$

$$0,697 \leq \eta_T \leq 0,723.$$

Это говорит о том, что связь между коэффициентом относительной силы

трения гасителя колебаний в вертикальной плоскости и коэффициентом динамической добавки вертикальных сил достаточно тесная и, значит, можно считать, что величины коэффициента относительной силы трения гасителя колебаний в процессе движения вагона в основном определяются величинами коэффициента динамической добавки вертикальной силы и в меньшей степени зависят от других факторов.

Приведенные в статье эмпирические формулы могут быть использованы на практике для определения сил трения фрикционного клинового гасителя колебаний тележек грузовых вагонов в процессе движения вагонов по реальному железнодорожному пути среднего (удовлетворительного) технического состояния, а также при конструировании фрикционных клиновых гасителей колебаний. При движении по железнодорожному пути хорошего состояния силы трения фрикционного клинового гасителя колебаний могут быть меньше на 15–20%, чем на пути удовлетворительного состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов П. С. Испытания вагонов. – М.: Маршрут, 2004.
2. Айвазян С. А. Применение методов корреляционного и регрессивного анализов и обработка результатов эксперимента. – Заводская лаборатория, – 1964, № 7 и № 8.
3. Болшев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1965.
4. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – М.: Физматгиз, 1961. ●

FRICTION FORCES IN FRICTIONAL WEDGE-STYLE OSCILLATION ABSORBER

Anisimov, Petr S. – D.Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The author studies dynamics of friction forces in frictional wedge-style damper of a freight car. He uses analytic method, correlation analysis, and proposes his own approach combining theoretical, empiric methods and formulae of mathematical statistics.

Key words: freight car, railway, forces of friction, frictional wedge damper, dynamic forces study, theory, empirics, correlation analysis.

Координаты автора (contact information): Анисимов П. С. – (495) 684–2210

