УДК 621.86.078.9

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В. Д. РОГОЖИН, О. А. ПОНОМАРЁВА
Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

Работоспособность подвески колесного ТС (далее – ТС) напрямую связана с устойчивостью, тормозной динамикой и работой систем активной безопасности; оценка её технического состояния подлежит обязательному контролю, например при ГТО. Концепция предиктивного технического обслуживания колесных ТС предполагает количественную оценку наработки до предельного состояния и составление на этой основе графиков очередного ТО.

В качестве диагностического параметра выбран «коэффициент эффективности амортизатора» (далее – η), определяемый на вибростенде MAHA MSD 3000. Измерения величины η на стенде полностью автоматизированы; результаты сохраняются в протоколе, содержащем как значения η, так и пробег ТС. Величина коэффициента η обратно пропорциональна амплитуде колебаний на резонансе. Выборку значений η формировали на действующих СТО; данные структурированы в виде таблицы, где строки соответствуют ТС, а столбцы – номерам ТО [1]. Производитель вибростенда рекомендует пороговое значение η = 0,4.

Рассмотрены четыре класса моделей: линейная регрессия, полиномиальная регрессия 2-й степени, двухпараметрическая экспонента, трёхпараметрическая экспонента. Параметры определялись методом наименьших квадратов, для трёхпараметрической экспоненты применялась итерационная процедура Левенберга – Марквардта. В результате сравнения моделей по R^2, MAE, MAPE, AIC и BIC установлено, что при наличии не менее пяти точек после замены амортизаторов трёхпараметрическая экспонента обеспечивает наилучшее качество аппроксимации (R^2 до 0,97; MAE ≈ 3,4 тыс. км) [1]. При меньшем числе точек предпочтительнее двухпараметрическая экспонента.

Точечная оценка остаточного ресурса амортизаторов ТС не отражает статистическую неопределённость, обусловленную ограниченным объёмом наблюдений, погрешностью измерений и вариабельностью условий эксплуатации. Для практического применения необходима интервальная оценка.

Статистическую погрешность оценок параметров (a, b, c) регрессионной модели рассчитывают методом линеаризации, при котором дисперсия оценки критического пробега приближённо определяется через матрицу ковариаций оценок параметров модели Σ и вектор частных производных J:

$$\sigma^2_{L_{кр}} \approx J^T \Sigma J, \tag{1}$$

где $J = [\partial L_{кр}/\partial a, \partial L_{кр}/\partial b, \partial L_{кр}/\partial c]$.

Для трёхпараметрической экспоненты частные производные имеют вид

$$\frac{\partial L_{кр}}{\partial a} = \frac{1}{b \cdot a} \frac{1}{\left(\eta_{пор} - c\right) / a}; \tag{2}$$

$$\frac{\partial L_{кр}}{\partial b} = \frac{1}{b^2} \ln \frac{\eta_{пор} - c}{a}; \tag{3}$$

$$\frac{\partial \mathrm{L_{кр}}}{\partial c} = -\frac{1}{b \cdot \left(\eta_{пор} - c\right)}. \tag{4}$$

Ковариационная матрица Σ получается в процедуре нелинейного метода наименьших квадратов (это матрица, обратная информационной матрице Фишера). Доверительный интервал с уровнем значимости α:

$$L_{кр} \pm t_{\alpha/2, n-k} \cdot \sigma_{L_{кр}}, \tag{5}$$

где t – квантиль распределения Стьюдента с $n - k$ степенями свободы (n – число наблюдений; k – число параметров модели).

На скорость деградации влияют также условия эксплуатации ТС, поэтому вводится дополнительная составляющая дисперсии:

$$\sigma_{\Delta L} \approx \sqrt{RMSE^2 + \left(\Delta L \cdot CV_{усл}\right)^2}, \tag{6}$$

где $CV_{усл}$ – коэффициент вариации, зависящий от преобладающих условий эксплуатации (для городских условий $CV_{усл} \approx 0{,}15...0{,}20$; для смешанного цикла $CV_{усл} \approx 0{,}10...0{,}15$; для загородных $CV_{усл} \approx 0{,}05...0{,}10$).

Итоговый доверительный интервал

$$\Delta L_{дов} = \Delta L \pm z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_{\Delta L}, \tag{7}$$

где z – квантиль нормального распределения.

Разработанный программный модуль с используемыми в его алгоритме формулами (1)–(7) рассчитывает интервал, в котором с заданной вероятностью произойдёт достижение предельного состояния элементов подвески ТС, что предоставляет возможность заранее планировать посещение СТО с целью замены амортизаторов в ТС. Пользовательский интерфейс модуля реализован в виде набора диалоговых окон; для наглядности результатов прогнозирования предусмотрен экспорт отчёта в PDF и DOCX.

Повышение точности прогнозирования предполагает апробацию на большей выборке данных с учётом типа подвески и условий эксплуатации ТС, а также интеграцию с моделями машинного обучения, что позволит адаптировать прогнозирование остаточного ресурса элементов подвески к реальным условиям эксплуатации ТС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рогожин, В. Д.** Методика автоматизированного прогнозирования остаточного ресурса элементов подвески транспортных средств категории М1 / В. Д. Рогожин, О. А. Пономарёва // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 3. – С. 55–62.