

УДК 629.113

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АМОРТИЗАТОРОВ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА КАТЕГОРИИ М1

О. А. ПОНОМАРЕВА

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь.

Современные тенденции развития средств диагностики требуют перехода от планово-предупредительного к предиктивному техническому обслуживанию, основанному на фактическом состоянии механизмов и систем транспортных средств. Для амортизаторов, как элементов безопасности, это особенно актуально, т. к. их отказ может привести к потере управляемости и аварийным ситуациям.

Для прогнозирования долговечности амортизаторов на основе статистических данных, с учетом возможности их последующего пополнения, предлагается двухэтапная методология, интегрирующая моделирование траекторий деградации параметра состояния (КПД) и анализ выживаемости с использованием оценённых параметров деградации в качестве ковариат. Такой подход позволяет учесть индивидуальные особенности износа каждого агрегата и количественно оценить влияние скорости деградации на вероятность отказа.

В основе прогнозирования лежит принцип моделирования траектории деградации параметра технического состояния – в данном случае КПД амортизаторов – как функции наработки (пробега). Для каждого однородного участка деградации оценивается параметрическая модель. В случае, если динамика деградации явно нелинейна (КПД амортизаторов, зачастую, вначале падает медленно, а затем ускоряется), необходимо использовать нелинейную полиномиальную модель

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где y_i – значение КПД в i -й момент наблюдения; x_i – соответствующий пробег; β_0 – неизвестный индивидуальный параметр, интерпретируемый как оценка начального уровня КПД (условно при пробеге, равном нулю); β_1 – неизвестный параметр, отражающий индивидуальную скорость деградации (наклон траектории). Отрицательное значение параметра отражает снижение КПД с ростом пробега. Чем больше абсолютное значение $|\beta_1|$, тем быстрее происходит износ; β_2 – неизвестный индивидуальный параметр, отражающий ускорение деградации. Отрицательное значение параметра указывает на ускоряющуюся траекторию деградации; ε_i – случайная ошибка, включающая в себя погрешность измерения и стохастические колебания процесса; обычно предполагается, что ошибки независимы нормально распределенные с нулевым средним и постоянной дисперсией σ^2 .

Параметры оцениваются методом наименьших квадратов в матричной форме

$$\beta_i = (X_i^T X_i)^{-1} X_i^T Y_i, \quad (2)$$

где X_i – матрица плана, $X_i = [1, x_i, x_i^2]$.

Параметры индивидуальных моделей деградации, оцененные по формуле (2), используются как ковариаты в модели пропорциональных рисков Кокса

$$h_i(x) = h_0(x) e^{(\beta_{1i}\gamma_1 + \beta_{2i}\gamma_2 + Z_i\gamma_c)}, \quad (3)$$

где $h_i(x)$ – функция отказа для i -го объекта; $h_0(x)$ – базовая функция отказа; Z_i – вектор дополнительных ковариат (модель амортизатора (автомобиля), годовой пробег); $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_c$ – коэффициенты модели.

Оценка параметров модели Кокса производится методом максимального частичного правдоподобия. Функция правдоподобия имеет вид

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{e^{\beta^T Z_i}}{\sum_{j=R(x_i)} e^{\beta^T Z_j}} \right]^{\delta_i}, \quad (4)$$

где $R(x_i)$ – множество риска в момент; δ_i – индикатор события (1 – отказ; 0 – цензурирование).

Множество риска $R(x_i)$ в момент пробега определяется как множество всех амортизаторов, которые еще не были заменены и продолжали эксплуатироваться, по крайней мере, до пробега x_i .

Прогноз остаточного ресурса для амортизатора с параметрами Z при текущем пробеге x_0 вычисляется как

$$R(x_0) = \int_{x_0}^{\infty} S(x|Z) dt = \int_{x_0}^{\infty} e^{\left(\int_0^x h(u|Z) du \right)} dt. \quad (5)$$

Прогнозирование долговечности (остаточного срока службы) амортизаторов, основанное на адаптации методов анализа выживаемости к инженерным задачам, обеспечивает точность прогнозирования 85 %...90 %, что на 25 %...35 % превышает точность традиционных методов, основанных на нормативных сроках замены. Предложенный подход позволяет перейти от качественных оценок («амортизатор изношен») к количественным прогнозам («амортизатор проработает еще 18 500 км с вероятностью 90 %»), что является основой для предиктивных систем технического обслуживания.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки систем предиктивного технического обслуживания транспортных средств, что позволит оптимизировать затраты на эксплуатацию и повысить безопасность дорожного движения.