

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ КАТЕГОРИИ М1 НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИХ ДЕГРАДАЦИИ**

ПОНОМАРЁВА О. А., РОГОЖИН В. Д.

**(Белорусско-Российский университет;
г. Могилев, Республика Беларусь)**

Подвеска транспортного средства (далее – ТС) является одной из систем, непосредственно влияющих на безопасность дорожного движения, эксплуатационную надежность ТС и комфорт при перевозке пассажиров. Элементы подвески в процессе эксплуатации подвергаются износу, под воздействием различных факторов, таких как циклические нагрузки, трибологическое взаимодействие в подвижных сопряжениях, температурное воздействие на рабочую жидкость, а также влияние агрессивных сред и дорожных реагентов [1]. Следствием указанных процессов является параметрическая деградация демпфирующих свойств элементов подвески: плавное снижение силы сопротивления амортизатора на ходах сжатия и отбоя, потеря герметичности и увеличение зазоров в направляющих элементах.

В настоящее время в практике технического обслуживания и ремонта ТС применяются различные методы диагностики амортизаторов, реализуемые преимущественно на вибростендах. Основными из них являются [2]:

– Амплитудно-резонансный метод (BOGE/МАНА) – основан на измерении амплитуды колебаний колеса при резонансной частоте. Достоинства: простота и скорость. Недостатки: зависимость от приблизительных нормативных значений, требование точного позиционирования, отсутствие учета индивидуальных особенностей подвески.

– Метод оценки сцепления с дорогой (EUSAMA) – измеряет отношение минимального динамического веса колеса к статическому. Достоинства: прямая оценка контакта шины с дорогой. Недостатки: критичность к позиционированию, отсутствие вращения колес при диагностике, влияние жесткости шин.

– Метод на основе принципа Тета (коэффициент демпфирования по Леру) – оценивает затухание колебаний системы «колесо-стенд». Достоинства: не требует знания параметров автомобиля. Недостатки: влияние сил трения в подвеске и упругих характеристик шин на точность расчета.

Каждый из этих методов позволяет оценить текущее техническое состояние амортизатора в момент проведения измерений, однако они не дают количественной оценки продолжительности дальнейшей эксплуатации ТС до момента, когда характеристики узла выйдут за допустимые пределы.

Основываясь на практическом опыте, чаще всего замена амортизаторов на ТС производится преждевременно, т.е. до исчерпания их ресурса, что влечет за собой необоснованные эксплуатационные затраты, либо амортизаторы продолжают использоваться после того, как их демпфирующие свойства снизились ниже допустимого уровня, что создает предпосылки для ухудшения управляемости и устойчивости ТС.

Переход к предиктивному обслуживанию ТС, основанному на прогнозировании остаточного ресурса его систем, узлов и агрегатов, позволяет: количественно оценить наработку до момента, когда их характеристики выйдут за допустимые пределы; оптимизировать графики проведения технических воздействий; оптимизировать эксплуатационные затраты и обеспечить требуемый уровень активной безопасности ТС [3].

Среди существующих подходов к прогнозированию остаточного ресурса систем, узлов и агрегатов ТС выделяют физико-модельные методы, статистические методы и методы, основанные на данных [4]. Физико-модельные методы требуют детального знания параметров материалов и нагрузок, что при массовом обслуживании ТС затруднительно. Методы, основанные на данных (машинное обучение, нейронные сети), обладают высокой точностью, но требуют больших объемов структурированной информации для обучения. Статистические методы, в частности регрессионный анализ, представляют собой оптимальный компромисс между точностью прогноза и требованиями к исходным данным. Эти методы позволяют на основе накопленных результатов диагностики построить математическую модель, описывающую изменение диагностического параметра во времени, и экстраполировать ее на будущий период эксплуатации [3].

В качестве диагностического параметра был выбран коэффициент эффективности амортизатора (η), измеряемый на вибростенде МАНА-ShockDiagnostic MSD 3000 по амплитудно-резонансному методу. Данный параметр широко применяется в практике диагностики, имеет установленные пороговые значения и демонстрирует устойчивую корреляцию со степенью износа амортизатора [5].

Коэффициент эффективности регистрируется в протоколах результатов диагностирования, что позволяет формировать базы данных для последующего статистического анализа. В ходе настоящего исследования накоплены данные по 7 моделям ТС категории М1 с общим объемом выборки более 150 наблюдений, что обеспечило репрезентативность статистического анализа.

Принципом, лежащим в основе прогнозирования, является моделирование траектории деградации параметра технического состояния – в данном случае коэффициента эффективности – как функции наработки (пробега). Наиболее распространенным и интерпретируемым подходом является регрессионный анализ, позволяющий аппроксимировать зависимость между пробегом t и коэффициентом эффективности y .

Для каждого i -го ТС (или комплекта амортизаторов) оценивается модель зависимости коэффициента эффективности от пробега:

$$y_{ij} = f(t_{ij}, \theta_i) + \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

где y_{ij} – значение коэффициента эффективности на j -м ТО;

t_{ij} – пробег i -го автомобиля до j -го ТО;

θ_i – вектор индивидуальных параметров;

ε_{ij} – случайная ошибка, которая включает в себя погрешность измерения и стохастические колебания процесса; обычно предполагается, что ошибки независимые, нормально распределенные с нулевым средним и постоянной дисперсией σ^2 .

Для исследования были выбраны три типа моделей: линейная $f(t, \beta_{0i}, \beta_{1i}) = \beta_{0i} + \beta_{1i}t$; квадратичная $f(t, \beta_{0i}, \beta_{1i}, \beta_{2i}) = \beta_{0i} + \beta_{1i}t + \beta_{2i}t^2$ и экспоненциальная $f(t, \beta_{0i}, \beta_{1i}, \beta_{2i}) = \beta_{0i} + \beta_{1i}e^{-\beta_{2i}t}$ (где β_0 – индивидуальный параметр, интерпретируемый как оценка начального уровня коэффициента эффективности, условно, при пробеге, равным нулю; β_1 – индивидуальный параметр, отражающий индивидуальную скорость деградации; β_2 – индивидуальный параметр, отражающий ускорение деградации).

Оценочные индивидуальные параметры регрессии определялись методом наименьших квадратов (МНК), минимизирующим сумму квадратов отклонений, используя формулу (2) для линейной регрессии, формулу (3) для полиномиальной регрессии и формулу (4) для экспоненциальной регрессии:

$$S(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 t)^2 \rightarrow \min_{\beta_0, \beta_1} \quad (2)$$

$$S(\beta_0, \beta_1, \beta_2) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 t - \beta_2 t^2)^2 \rightarrow \min_{\beta_0, \beta_1, \beta_2} \quad (3)$$

$$S(\beta_0, \beta_1, \beta_2) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 e^{-\beta_2 t})^2 \rightarrow \min_{\beta_0, \beta_1, \beta_2} \quad (4)$$

После построения индивидуальных моделей деградации для каждого ТС или комплекта амортизаторов проведен анализ адекватности полученных моделей для обеспечения достоверности последующего прогноза остаточного ресурса амортизатора. Для задачи прогнозирования остаточного ресурса амортизаторов наиболее релевантными, с точки зрения оценки качества построенных моделей, являются среднеквадратическая ошибка RMSE (для оценки абсолютной ошибки), средняя абсолютная процентная ошибка MAPE (для относительной ошибки) и коэффициент детерминации R^2 (для оценки объясняющей способности модели).

Из трех рассматриваемых моделей была выбрана та, которая обеспечивает максимальное значение R^2 и минимальные значения RMSE и MAPE. Согласно полученным результатам, квадратичная модель показала наилучшие показатели адекватности $R^2 \geq 0,85$, $RMSE \leq 0,0212$, $MAPE \leq 2,45\%$ для всего спектра рассмотренных ТС. Она была принята для прогнозирования остаточного ресурса амортизаторов ТС. При накоплении новых данных необходимо проводить периодическое уточнение моделей для повышения точности прогнозирования.

Остаточный ресурс (RUL) определялся как разность между прогнозным пробегом до достижения порогового значения $t_{\text{пор}}$ и текущим пробегом $t_{\text{тек}}$ на момент последнего диагностирования: $RUL = t_{\text{пор}} - t_{\text{тек}}$.

Для реализации предложенной методики разработан программный модуль на языке VBA, интегрированный в среду MS Excel, который позволил: накапливать результаты диагностирования подвески ТС в базе данных; автоматически строить модель деградации для выбранного ТС; оценивать адекватность модели; рассчитывать остаточный ресурс объекта воздействия и в завершении – формировать для владельцев ТС рекомендации по замене амортизаторов.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для разработки системы предиктивного технического обслуживания подвески ТС, что позволит оптимизировать затраты на эксплуатацию ТС и повысить безопасность дорожного движения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дербаремдикер А.Д. Амортизаторы транспортных машин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 200 с.
2. Доморозов А.Н., Нгуен Ван Ньянь. Анализ методов диагностирования технического состояния подвесок АТС на современных вибростендах // Вестник ИрГТУ. – 2010. – № 5 (45). – С. 38–44.
3. Пегачков А.А., Зорин В.А. Обеспечение долговечности машин по результатам анализа технического состояния. – М. : МАДИ, 2023. – 120 с.
4. Дмитриенко А.Г., Блинов А.В., Волков Д.В., Волков В.С. Техническая диагностика. Оценка состояния и прогнозирование остаточного ресурса технически сложных объектов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2013. – 62 с.
5. Стенд МАНА MSD 3000 для проверки амортизаторов. – Режим доступа <https://www.maha.ru/informatsi/stati/stend-maha-msd-3000-dlya-proverki-amortizatorov/> [Дата доступа 28.03.2026].