

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-3-55-62

УДК 621.86.078.9

В. Д. РОГОЖИН, канд. техн. наук, доц.

О. А. ПОНОМАРЁВА

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ КАТЕГОРИИ М1

Аннотация

Представлена методика автоматизированного прогнозирования остаточного ресурса амортизаторов подвески транспортных средств категории М1 по данным периодического диагностирования. Диагностический параметр – коэффициент эффективности амортизатора, измеряемый на вибростенде МАНА MSD 3000. На основе более 140 наблюдений построены четыре регрессионные модели деградации и оценена их адекватность. Установлено, что трехпараметрическая экспоненциальная модель обеспечивает наивысшую точность (R^2 до 0,973, $MAE \approx 3400$ км). Методика реализована в виде программного модуля VBA для MS Excel, позволяет количественно оценить наработку до достижения порога $\eta = 0,4$ и обоснованно планировать замену амортизаторов в рамках предиктивного обслуживания. Предложенный подход не требует дополнительного дорогостоящего оборудования и может быть внедрен в практику станций технического обслуживания для планирования замены элементов подвески в рамках предиктивного (прогнозного) обслуживания.

Ключевые слова:

транспортные средства категории М1, подвеска, амортизаторы, остаточный ресурс, прогнозирование деградации, регрессионный анализ, экспоненциальная модель, коэффициент эффективности амортизатора, предиктивное техническое обслуживание.

Для цитирования:

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 (92). – С. 55–62.

Введение

Состояние подвески транспортного средства категории М1 (далее – ТС, ТС кат. М1) определяет не только комфорт водителя и пассажиров, но и устойчивость ТС, эффективность торможения и корректность работы систем активной безопасности. В реальных условиях эксплуатации на элементы подвески действуют переменные нагрузки, трение в подвижных соединениях, перепады температур, а также химические реагенты, что неизбежно приводит к постепенному снижению их рабочих характеристик. Данный процесс, называемый параметрической деградацией, проявляется в падении демпфирующей способности амортизаторов, потере их

герметичности и увеличении люфтов в подвижных звеньях элементов подвески ТС.

В практике на СТО для оценки состояния амортизаторов ТС кат. М1 применяются вибростенды, реализующие различные методы, позволяющие зафиксировать текущий уровень работоспособности амортизаторов, но не дающие количественной оценки остаточного ресурса амортизаторов (в километрах пробега или времени) до момента выхода их параметров за допустимые границы. В результате специалисты СТО рекомендуют владельцам ТС либо заменять элемент подвески досрочно, что для владельца ТС влечет неоправданные расходы, либо он рискует безопасностью движения, эксплуатируя ТС с уже неэф-

фективным демпфированием подвески ТС.

Современная концепция предиктивного (прогнозного) технического обслуживания (далее – ТО) ТС предполагает не просто констатацию факта неисправности, а количественную оценку наработки до наступления предельного состояния. Такой подход позволяет оптимизировать графики технических воздействий на узлы, агрегаты и системы ТС, снизить затраты на ТО и ТР и повысить безопасность движения. Среди множества методов прогнозирования остаточного ресурса технических объектов (физико-модельные, эмпирические, основанные на машинном обучении) наиболее приемлемым для условий эксплуатации ТС кат. М1 является статистический, в частности регрессионный анализ.

Основная часть

В качестве информативной характеристики, доступной для измерения на СТО диагностическим оборудованием для подвески ТС кат. М1, выбран коэффициент эффективности амортизатора (в процентах), определяемый на вибростенде МАНА MSD 3000 [1]. Эта величина регулярно фиксируется в протоколах результатов диагностирования, что позволяет накапливать массивы данных, необходимые для построения статистических моделей технического состояния подвески ТС кат. М1.

Метод, реализованный в указанном выше диагностическом стенде, заключается в возбуждении колебаний измерительных платформ с частотой 10 Гц и последующим снижением до 5 Гц. При прохождении через резонансную частоту подвески фиксируется максимальная амплитуда колебаний, которая пересчитывается в коэффициент эффективности. Метод моделирует реальные условия нагружения амортизаторов, поскольку частота колебаний соответствует частоте собственных колебаний кузова

(0,8...1,2 Гц) и частотам возмущений от дорожных неровностей. Процесс измерений полностью автоматизирован, результаты выводятся на монитор ПК и могут быть сохранены в виде протокола, в котором фиксируются значения коэффициента эффективности и пробег ТС [1].

Результаты диагностирования для исследования собирались на действующих СТО в период 2024–2025 гг. В выборку включались ТС кат. М1, прошедшие плановое диагностирование подвески. Накопленная выборка (более 140 наблюдений, 7 моделей ТС, широкий диапазон пробегов) является достаточно репрезентативной для построения регрессионных моделей деградации и последующего прогнозирования остаточного ресурса. Данные структурированы в виде таблицы (рис. 1), где строки соответствуют автомобилям, а столбцы – номерам ТО. Для каждого ТС кат. М1 представлены две строки: первая содержит значения коэффициента эффективности, вторая – соответствующие пробеги (в километрах).

Коэффициент эффективности η отражает способность амортизатора гасить колебания подвески. При резонансной частоте, когда амплитуда колебаний максимальна, значение η обратно пропорционально амплитуде: чем лучше демпфирование, тем меньше амплитуда и выше η . В процессе эксплуатации ТС в узлах подвески из-за износа уплотнений, потери вязкости рабочей жидкости и увеличения зазоров демпфирующая сила падает, что проявляется в снижении значения коэффициента эффективности η .

Пробег ТС (или наработка) L измеряется в тысячах километров, что обусловлено типичными интервалами между ТО (10...15 тыс. км).

Остаточный ресурс ΔL – прогнозируемая величина наработки от текущего момента (последнего измерения) до момента достижения порогового значения $\eta = 0,4$:

$$\Delta L = L(\eta - 0,4) - L_{\text{тек}}, \quad (1) \quad \text{где } L_{\text{тек}} - \text{текущий пробег, тыс. км.}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1			TO-1	TO-2	TO-3	TO-4	TO-5	TO-6	TO-7	TO-8	TO-9
2	Skoda Rapid	коэфф. эффективности	94%	88%	81%	73%	64%	53%	40%	96%	89%
3		пробег	15248	28975	44726	58537	72443	86979	100012	114134	124994
4	Skoda Octavia	коэфф. эффективности	94%	90%	85%	76%	64%	53%	44%	95%	90%
5		пробег	14226	28220	42711	56463	70501	84203	98963	111079	121705
6	Skoda Kodiaq	коэфф. эффективности	96%	93%	87%	80%	76%	68%	60%	53%	47%
7		пробег	10385	24065	34717	40070	52487	63403	72714	81353	90841
8	Skoda Fabia	коэфф. эффективности	97%	91%	85%	79%	70%	61%	50%	43%	34%
9		пробег	12089	22796	36868	50543	60452	73976	87839	103450	117243
10	VW Polo	коэфф. эффективности	95%	88%	83%	77%	68%	59%	50%	40%	32%
11		пробег	10310	24343	39543	52056	64927	79290	86901	101729	115544
12	VW Polo	коэфф. эффективности	95%	90%	82%	76%	69%	58%	47%	38%	95%
13		пробег	13876	22704	38635	51634	65391	80022	94788	107578	114660
14	VW Polo	коэфф. эффективности	96%	92%	85%	79%	71%	63%	53%	45%	37%
15		пробег	13362	24983	35256	50256	63077	76453	89911	104696	114641

Рис. 1. Данные диагностирования подвески для исследования (фрагмент)

На основе физики износа элементов подвески ТС кат. М1 и формы кривых рассмотрены четыре класса моделей:

1) линейная регрессия $\eta(L) = a \cdot L + b$, отражающая постоянную скорость деградации, но не учитывающая ускорение износа;

2) полиномиальная регрессия 2-й степени $\eta(L) = a \cdot L^2 + b \cdot L + c$, которая позволяет описать выпуклость ($c < 0$);

3) экспоненциальная двухпараметрическая регрессия $\eta(L) = a \cdot e^{-bL}$, которая предполагает, что коэффициент эффективности стремится к нулю, но иногда занижает ресурс;

4) экспоненциальная трехпараметрическая $\eta(L) = a \cdot e^{-bL} + c$, учитывающая остаточную эффективность при

$L \rightarrow \infty$ и скорость деградации.

Параметры моделей находились классическим методом наименьших квадратов в MS Excel с использованием встроенной надстройки «Поиск решения» [2]. Уравнения деградации и значения коэффициента детерминации по моделям ТС кат. М1 представлены в табл. 1.

После построения индивидуальных моделей деградации для каждого ТС или комплекта амортизаторов проведен анализ адекватности полученных моделей для обеспечения достоверности последующего прогноза остаточного ресурса. Для задачи прогнозирования остаточного ресурса амортизаторов наиболее релевантными для оценки качества построенных моделей являются:

– коэффициент детерминации R^2 (для оценки объясняющей способности модели);

– среднеквадратическая ошибка RMSE (для оценки абсолютной ошибки);

– средняя абсолютная ошибка прогноза остаточного ресурса MAE (среднее отклонение прогнозируемого пробега до порогового значения коэффициента эффективности 0,4 от фактического пробега замены в километрах);

– средняя абсолютная процентная ошибка аппроксимации MAPE (среднее относительное отклонение предсказанного коэффициента эффективности от

измеренного), информационные критерии Акаике AIC и Байеса BIC.

Для трёхпараметрической экспоненты дополнительно проверяется физическая обоснованность асимптоты c .

Из четырех рассматриваемых моделей выбирается та, которая обеспечивает наивысшее значение R^2 и наименьшие значения MAE и MAPE и информационных критериев AIC и BIC (табл. 2).

Табл. 1. Модели деградации

ТС кат. M1	Модель регрессии	Уравнение	R^2
Skoda Kodiaq	Линейная	$\eta(L) = 0,92 - 5,2 \cdot 10^{-6}L$	0,87
	Полином 2-й степени	$\eta(L) = 1,2 \cdot 10^{-11}L^2 - 7,1 \cdot 10^{-6}L + 0,96$	0,93
	2-парам. экспонента	$\eta(L) = 0,97e^{-1,9 \cdot 10^{-5}L}$	0,94
	3-парам. экспонента	$\eta(L) = 0,63e^{-1,5 \cdot 10^{-5}L} + 0,34$	0,973
Skoda Octavia	Линейная	$\eta(L) = 0,98 - 3,1 \cdot 10^{-6}L$	0,82
	Полином 2-й степени	$\eta(L) = 8,2 \cdot 10^{-12}L^2 - 4,5 \cdot 10^{-6}L + 0,97$	0,92
	2-парам. экспонента	$\eta(L) = 0,98e^{-1,1 \cdot 10^{-5}L}$	0,95
	3-парам. экспонента	$\eta(L) = 0,87e^{-1,3 \cdot 10^{-5}L} + 0,10$	0,963
VW Polo	Линейная	$\eta(L) = 0,93 - 4,8 \cdot 10^{-6}L$	0,75
	Полином 2-й степени	$\eta(L) = 9,3 \cdot 10^{-12}L^2 - 5,2 \cdot 10^{-6}L + 0,94$	0,89
	2-парам. экспонента	$\eta(L) = 0,95e^{-1,6 \cdot 10^{-5}L}$	0,91
	3-парам. экспонента	$\eta(L) = 0,90e^{-1,7 \cdot 10^{-5}L} + 0,05$	0,92
Skoda Rapid	Линейная	$\eta(L) = 0,95 - 4,2 \cdot 10^{-6}L$	0,80
	Полином 2-й степени	$\eta(L) = 1,0 \cdot 10^{-12}L^2 - 5,0 \cdot 10^{-6}L + 0,94$	0,85
	2-парам. экспонента	$\eta(L) = 0,96e^{-1,4 \cdot 10^{-5}L}$	0,91
	3-парам. экспонента	$\eta(L) = 0,88e^{-1,5 \cdot 10^{-5}L} + 0,08$	0,96
Skoda Yeti	Линейная	$\eta(L) = 0,97 - 5,5 \cdot 10^{-6}L$	0,79
	Полином 2-й степени	Нестабилен	0,82
	2-парам. экспонента	$\eta(L) = 0,96e^{-1,8 \cdot 10^{-5}L}$	0,85
	3-парам. экспонента	Мало точек	—

Табл. 2. Сводная таблица оценки адекватности регрессионных моделей по всем ТС

ТС кат. M1	Модель регрессии	R ²	MAE, км	MAPE, %	AIC	BIC	Асимптота	Оценка адекватности
Skoda Kodiatq	Линейная	0,87	7200	12,4	–58,2	–57,6	–	Неадекватна
	Полином 2-й степени	0,93	4700	7,8	–67,5	–66,4	–	Условно адекватна
	2-парам. экспонента	0,94	3800	6,9	–70,1	–69,1	0	Адекватна
	3-парам. экспонента	0,973	2800	4,2	–79,3	–77,8	0,34	Наиболее адекватна
Skoda Octavia	Линейная	0,82	7500	10,5	–45,3	–44,5	–	Неадекватна
	Полином 2-й степени	0,92	5200	6,2	–53,8	–52,4	–	Условно адекватна
	2-парам. экспонента	0,95	3500	4,8	–61,2	–60,4	0	Адекватна
	3-парам. экспонента	0,963	3100	4,1	–60,5	–59,0	0,10	Наиболее адекватна
VW Polo	Линейная	0,75	8400	13,1	–32,1	–31,4	–	Неадекватна
	Полином 2-й степени	0,89	5600	8,4	–41,5	–40,1	–	Условно адекватна
	2-парам. экспонента	0,91	4200	5,2	–49,8	–49,0	0	Адекватна
	3-парам. экспонента	0,92	4600	7,6	–44,3	–42,8	0,05	Неадекватна
Skoda Rapid	Линейная	0,80	7800	11,8	–51,0	–50,3	–	Неадекватна
	Полином 2-й степени	0,85	6300	7,2	–62,4	–61,0	–	Условно адекватна
	2-парам. экспонента	0,91	4000	5,0	–70,5	–69,5	0	Адекватна
	3-парам. экспонента	0,96	3600	3,9	–78,2	–76,7	0,08	Наиболее адекватна
Skoda Yeti	Линейная	0,79	7900	14,2	–21,7	–21,1	–	Неадекватна
	Полином 2-й степени	0,82	8000	12,5	–24,5	–23,1	–	Неадекватна
	2-парам. экспонента	0,85	5500	8,1	–30,2	–29,5	0	Адекватна
	3-парам. экспонента	–	–	–	–	–	–	Невозможно оценить ($n < 5$)

По результатам анализа данных из табл. 2 установлено, что при наличии более пяти точек после последней замены амортизаторов трехпараметрическая экспонента превосходит по всем метрикам, а при малом числе точек предпочтительнее двухпараметрическая экспонента. Полиномиальная зависимость может использоваться как резервный вариант, а линейная регрессия для

данного процесса непригодна. При накоплении новых данных необходимо проводить периодическое уточнение моделей для повышения точности прогнозирования.

Сравнение средней абсолютной ошибки прогноза остаточного ресурса MAE (правая ось, тыс. км) и средней абсолютной процентной ошибки аппроксимации MAPE (левая ось, %) для

четырёх регрессионных моделей представлено на рис. 2.

Трёхпараметрическая экспонента демонстрирует наименьшие значения обоих критериев, что подтверждает ее предпочтительность для описания деградации амортизаторов.

Критический пробег $L_{кр}$, при котором коэффициент эффективности достигает порогового значения $\eta_{пор} = 0,4$, заданного производителем, определяется из решения уравнения трёхпараметрической экспоненциальной модели.

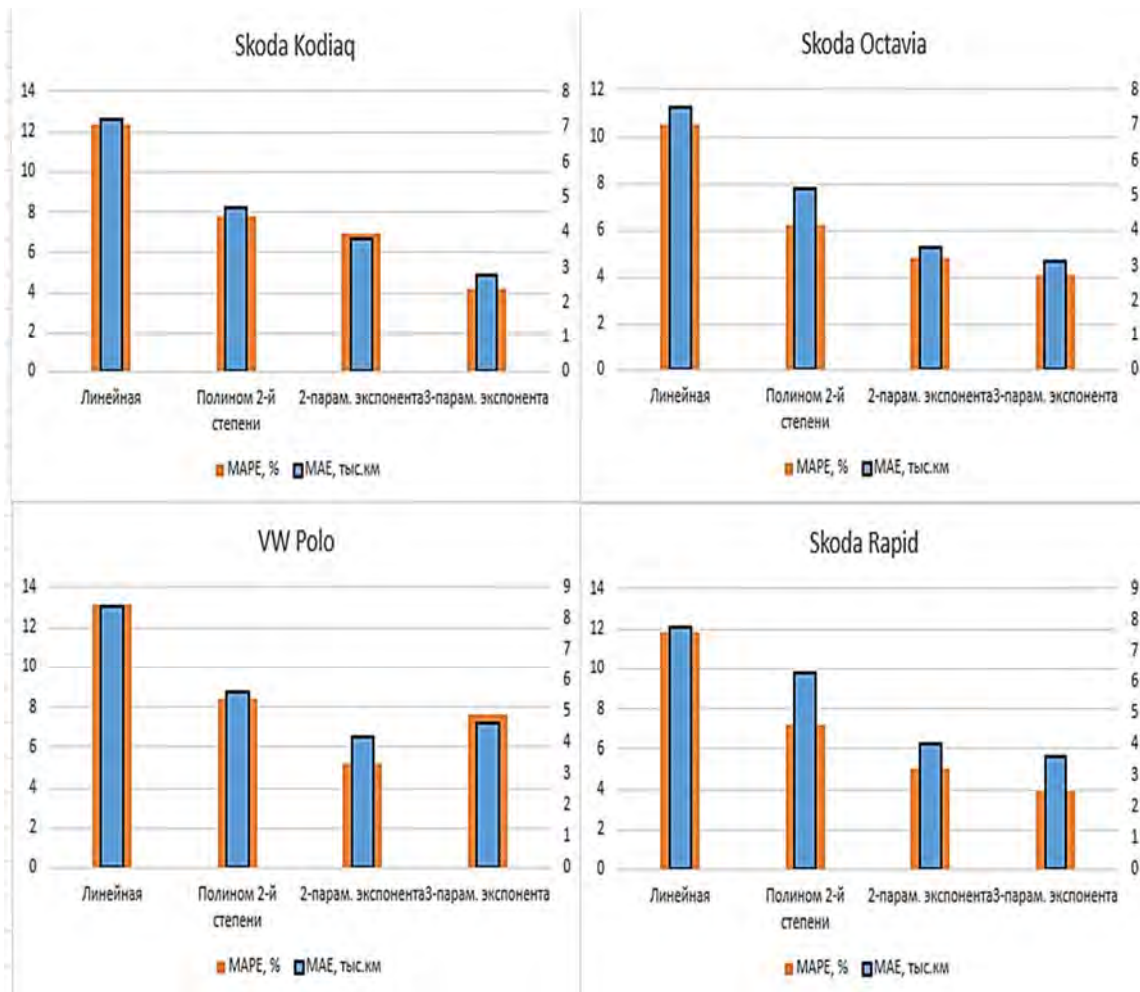


Рис. 2. Сравнение средней абсолютной ошибки прогноза остаточного ресурса MAE (правая ось, тыс. км) и средней абсолютной процентной ошибки аппроксимации MAPE (левая ось, %) для четырёх регрессионных моделей

В явном виде

$$L_{кр} = -\frac{1}{b} \ln \left(\frac{\eta_{пор} - c}{a} \right),$$

если $c < \eta_{пор}$.

Остаточный ресурс (пробег) до

замены амортизаторов вычисляется как

$$\Delta L = \begin{cases} 0, & \text{если } L_{кр} \leq L_{тек}; \\ L_{кр} - L_{тек}, & \text{если } c < 0,4; \\ > 200000, & \text{если } c > 0,4. \end{cases}$$

Рекомендуемый остаточный ре-

курс – пробег, который ТС кат. М1 может проехать до момента, когда коэффициент эффективности амортизаторов достигнет порога 0,4. При положительном значении коэффициента эффективности указывается число километров; при нулевом – требуется немедленная замена; при асимптоте выше порога – замена не потребуется в пределах 200000 км.

Разработанная методика автоматизированного прогнозирования остаточного ресурса элементов подвески ТС кат. М1 базируется на анализе исторических данных планового (или гарантийного) ТО и включает пять последовательных этапов. Собственно методика состоит из следующих этапов.

1. Сбор и первичная обработка экспериментальных данных (коэффициент эффективности амортизаторов и соответствующие пробеги на моментах плановых ТО).

2. Выявление моментов замены амортизаторов по скачкообразному изменению коэффициента эффективности.

3. Построение индивидуальных деградационных кривых для каждого ТС кат. М1.

4. Определение критического пробега, при котором коэффициент эффективности амортизаторов достигает порогового значения $\eta = 0,4$.

5. Расчет остаточного ресурса элементов подвески и формирование рекомендации.

Заключение

Предложенная методика автоматизированного прогнозирования остаточного ресурса элементов подвески дает возможность в условиях СТО количественно оценить оставшийся ресурс амортизаторов ТС кат. М1 без дорогостоящего стендового оборудования – только по данным регулярных замеров коэффициента эффективности на диагностическом оборудовании. Погрешность прогноза ($MAE \approx 3400$ км) приемлема для планирования замены в рамках планово-предупредительной системы ТО и ТР.

Для реализации предложенной методики разработан программный модуль на языке VBA, интегрированный в среду MS Excel, который накапливает результаты диагностирования в базе данных, автоматически составляется модель деградации для выбранного ТС кат. М1, оценивается адекватность модели, рассчитывается остаточный ресурс и формируются рекомендации по замене элементов подвески – амортизаторов.

Апробация предложенной методики на большем количестве ТС кат. М1 с учетом типа подвески и условий эксплуатации, а также введение доверительных интервалов для прогноза остаточного ресурса позволит сделать прогнозирование остаточного ресурса элементов подвески более точным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стенд МАНА MSD 3000 для проверки амортизаторов. – URL: <https://www.maha.ru/informatsi/stati/stend-maha-msd-3000-dlya-proverki-amortizatorov> (дата обращения: 01.04.2026).
2. **Борздова, Т. В.** Основы статистического анализа и обработка данных с применением Microsoft Excel : учеб. пособие / Т. В. Борздова. – Мн. : БГУ, 2011. – 75 с.

Статья сдана в редакцию 15 мая 2026 года

Контакты:

vd-al@yandex.by (Рогожин Владимир Дмитриевич);
olse-fam@mail.ru (Пономарёва Ольга Александровна).

V. D. ROGOZHIN, O. A. PONOMAREVA

METHODOLOGY FOR AUTOMATED FORECASTING OF RESIDUAL LIFE OF M1 CATEGORY VEHICLE SUSPENSION COMPONENTS

Abstract

The paper presents a method for automatically forecasting the residual life of suspension shock absorbers in M1 category vehicles, based on periodic diagnostics data. The diagnostic parameter is the shock absorber efficiency coefficient measured on the MAHA MSD 3000 test bench. Based on more than 140 observations, four regression models of degradation have been constructed and their adequacy has been assessed. It has been established that the three-parameter exponential model provides the highest accuracy (R^2 up to 0,973, MAE $\approx$ 3,400 km). The methodology is implemented as a VBA software module for MS Excel and enables a quantitative assessment of service life before reaching the $\eta = 0,4$ threshold, allowing for rational scheduling of shock absorber replacements as part of predictive maintenance. The proposed approach does not require additional expensive equipment and can be introduced into the practice of service stations to plan the replacement of suspension elements within a predictive maintenance framework.

Keywords:

M1 category vehicles, suspension, shock absorbers, residual life, degradation forecasting, regression analysis, exponential model, shock absorber efficiency factor, predictive maintenance.

For citation:

Rogozhin, V. D. Methodology for automated forecasting of residual life of M1 category vehicle suspension components / V. D. Rogozhin, O. A. Ponomareva // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 3 (92). – P. 55–62.