

АДАПТИВНЫЙ ЕЗДОВОЙ ЦИКЛ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСХОДА ТОПЛИВА ЛЕГКОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ

А.А. Колин

ORCID: 0000-0001-5151-0260 e-mail: kolinaa@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

В.В. Беляков

ORCID: 0000-0003-0203-9403 e-mail: belyakov@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

С.Е. Манянин

ORCID: 0009-0003-0245-0638 e-mail: sergmanian@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

А.В. Тумасов

ORCID: 0000-0002-3766-4615 e-mail: anton.tumasov@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Разработан метод обратной адаптации ездового цикла NEDC, обеспечивающий привязку реальных данных движения к стандартному циклу при фиксированных стратегиях переключения передач. Метод сочетает машинное обучение (градиентный бустинг) и компьютерную модель движения автомобиля. Интеграция компьютерной модели позволяет учитывать физические ограничения и компенсирует влияние технического состояния автомобиля, обеспечивая точность прогнозирования скорости с $MAE = 3,32$ км/ч и $R^2 = 0,88$. Адаптированный цикл отражает реалистичные режимы движения за счет увеличения разгонов и торможений на 12,8 % и 10,1 % соответственно, снижения движения на постоянных скоростях на 14,2 %. Это приводит к увеличению расхода топлива на 39 % (до 5,4 л/100 км), что согласуется с данными зарубежных исследований по переходу от NEDC к RDE. Методика может быть применена в процессе проектирования легких коммерческих автомобилей для оптимизации расхода топлива и выбросов вредных веществ, а также для внедрения адаптивных циклов в систему сертификации или мониторинга экологичности.

Ключевые слова: легкий коммерческий автомобиль, скоростной профиль, адаптивный ездовой цикл, расход топлива.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колин, А.А. Адаптивный ездовой цикл для оценки расхода топлива легкого коммерческого автомобиля / А.А. Колин, В.В. Беляков, С.Е. Манянин, А.В. Тумасов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 3. С. 108-116. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_3_108 EDN: NAQASP

ADAPTIVE DRIVE CYCLE FOR ESTIMATION OF FUEL CONSUMPTION OF A LIGHT COMMERCIAL VEHICLE

A.A. Kolin

ORCID: 0000-0001-5151-0260 e-mail: kolinaa@nntu.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

V.V. Belyakov

ORCID: 0000-0003-0203-9403 e-mail: belyakov@nntu.ru
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

S.E. Manyanin

ORCID: 0009-0003-0245-0638 e-mail: sergmanian@yandex.ru
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Tumasov

ORCID: 0000-0002-3766-4615 e-mail: anton.tumasov@gmail.com
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The work is devoted to the development of a method for reverse adaptation of the NEDC driving cycle, which provides a link to real driving data to the standard cycle with fixed gear shift strategies. The method combines machine learning (gradient boosting) and a computer model of vehicle motion. Integration of the computer model allows taking into account physical limitations and compensates for the influence of the technical condition of the vehicle, ensuring the accuracy of speed prediction with MAE = 3.32 km/h and $R^2 = 0.88$. The adapted cycle reflects realistic driving modes due to: an increase in acceleration and braking by 12.8 % and 10.1 %, respectively, a decrease in driving at constant speeds by 14.2 %. Which results in a 39 % increase in fuel consumption (up to 5.4 l/100 km), which is consistent with the data of foreign studies on the transition from NEDC to RDE. The methodology can be applied in the process of designing light commercial vehicles for: optimizing fuel consumption and emissions of harmful substances, introducing adaptive cycles into the certification system or monitoring environmental friendliness.

Key words: light commercial vehicle, speed profile, adaptive driving cycle, fuel consumption.

FOR CITATION: A.A. Kolin, V.V. Belyakov, S.E. Manyanin, A.V. Tumasov. Adaptive drive cycle for estimation of fuel consumption of a light commercial vehicle. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 3. Pp. 108-116. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_3_108 EDN: NAQASP

Введение

Современные методы оценки выбросов CO₂ или расхода топлива для легковых и легких коммерческих автомобилей базируются на стандартизированных циклах, таких как Новый европейский цикл езды (*New European Driving Cycle, NEDC*) и Всемирный гармонизированный цикл испытаний легковых автомобилей (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle, WLTC*). Данные процедуры нашли широкое применение не только для сертификации транспортных средств и сравнительного анализа их конкурентных преимуществ, но и в качестве основы для разработки методов оценки и снижения расхода топлива [1-3]. Скоростные профили циклов *NEDC* и *WLTC* легли в основу компьютерных моделей, используемых для оптимизации топливной экономичности и экологичности. Однако актуальность этих стандартизированных профилей вызывает сомнения, поскольку они не всегда соответствуют реальным условиям эксплуатации автомобилей.

Применение методики реальных выбросов при вождении (*Real Driving Emissions, RDE*) с использованием переносной системы измерения выбросов (*Portable Emissions Measurement System, PEMS*) выявило значительные расхождения между лабораторными данными и фактическими показателями выбросов. Исследования [4-8] демонстрируют, что переход от *NEDC* к *WLTC* увеличивает выбросы CO₂ на 22-31 %, а *RDE* превышает *NEDC* на 33-41 % для CO₂ и в 7-14 раз для NO_x. Приведенная статистика указывает на систематическое занижение выбросов в лабораторных условиях, что ставит под сомнение достоверность данных, предоставляемых в рамках ГОСТ 58554-2019. Стандарт требует информирования потребителей о выбросах CO₂ по циклу *NEDC*, однако он не соответствует реальным услови-

ям и занижает показатели выбросов вредных веществ. Решение задачи улучшения методов оценки экологических и экономических характеристик транспортных средств является актуальным направлением исследований, обозначенным также в приоритетах государственной политики РФ в области экологической безопасности и устойчивого развития, закрепленных в Распоряжении Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р

В научной литературе предлагаются различные подходы к решению данной задачи. В частности, авторы [9] предложили расчетно-экспериментальную методику оценки расхода топлива, учитывающую такие параметры, как макропрофиль поверхности пути, скорость движения и передачи КПП. Работа [10] направлена на корректировку ездового цикла для городских условий (г. Москва) с учетом данных о путевом расходе топлива, средней скорости и динамики движения легкового автомобиля в мегаполисе. Аналогичные подходы применялись в исследовании [11], где была предложена методика синтеза типичных городских ездовых циклов для низкотемпературных условий эксплуатации, основанная на выделении отдельных фаз движения, их группировке в кластеры методом К-средних и объединении в непрерывный скоростной профиль с использованием цепей Маркова. В работе [12] подчеркивается важность параметров массового расхода воздуха и скорости движения при расчете расхода топлива. Таким образом, создание скоростного профиля становится одним из ключевых шагов для точного прогнозирования расхода топлива.

Целью данного исследования является адаптация городского ездового цикла *NEDC* с учетом особенностей эксплуатации легких коммерческих автомобилей.

Объектом исследования является легкий коммерческий автомобиль (ЛКА) группы ГАЗ, категории N1-N2 с дизельным двигателем внутреннего сгорания (ДВС), соответствующий классу *Евро 5*. Его основные характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Исходные данные

Table 1.
Initial data

Параметр	Единица измерения	Значение
Полная масса автомобиля	кг	3500
Снаряженная масса автомобиля	кг	2548
Коэффициент аэродинамического сопротивления		0,402
Площадь поперечной проекции автомобиля	м	5,737
Коэффициент сопротивления качению при малых скоростях		0,006482
Коэффициент, учитывающий влияние скорости м/м	c^2/m^2	0,000057
Колесная база автомобиля	м	3,745
Горизонтальное расстояние от задней оси до центра масс	м	1,6371
Высота центра масс	м	0,882
Центр парусности	м	0,982
Время переключения передач	с	0,7
<i>Шины Cordiant Business CA-1 185/75 R16C</i>		
Момент инерции одного колеса	$кг \cdot м^2$	2,1
Число колес	шт.	6
Радиус статический	м	0,331
<i>Трансмиссия</i>		
Передаточное число главной передачи		4,3
Передаточные числа коробки переключения передач		5,065; 2,78; 1,591; 1; 0,807; 0,643

Продолжение табл. 1.
Исходные данные
Table 1 (continued).
Initial data

Параметр	Единица измерения	Значение
<i>Двигатель Cummins ISF2.8</i>		
Момент инерции ДВС	кг·м ²	0,323
Максимальная мощность при 3600 об/мин	кВт	120
Максимальный крутящий момент при 2200 – 3200 об/мин	Н·м	330
Объем двигателя	см ³	2781
Обороты холостого хода	об/мин	750

В отличие от рассмотренных подходов, предлагается метод обратной адаптации, где реальные данные привязываются к *NEDC* при фиксированных стратегиях переключения передач, с замкнутой коррекцией скоростного профиля через связку *ML* (машинное обучение) с имитационной моделью движения автомобиля.

Предложенный метод обратной адаптации, основанный на интеграции *ML* и имитационной модели движения, обеспечивает более достоверное прогнозирование расхода топлива и выбросов CO₂ на этапе проектирования. Это способствует не только соблюдению нормативных требований, но и развитию экологичного автотранспорта, что имеет существенное значение для устойчивого развития страны.

Методология

В рамках исследования был проведен ряд заездов по территории Нижнего Новгорода и Нижегородской области. Суммарная протяженность маршрутов составила более 2000 км. Замеры проводились в одно и то же время, в одинаковых погодных условиях, в двух направлениях. Фиксировались значения, полученные с блока *Electronic control module (ECM)* и *Race LogicV Box6*:

- частота вращения двигателя, мин⁻¹;
- процент действия педали акселератора, %;
- процент загрузки двигателя, %;
- положение датчика педали сцепления, нажат/отпущено;
- положение датчика педали тормоза, нажат/отпущено;
- скорость транспортного средства, км/ч;
- высота над уровнем моря, м.

Для исключения влияния износа и особенностей эксплуатации автомобиля использована отлаженная компьютерная модель [13], которая:

- компенсирует влияние технического состояния между автомобилями;
- фиксирует стратегию переключения передач.

В компьютерную модель были загружены данные для городской части движения, для определения путевого и мгновенного расхода топлива и проведена компьютерная симуляция по городской части цикла *NEDC*, также известной как урбанизированный динамометрический цикл езды (*Urban Dynamometer Driving Cycle, UDC*). После выполнения симуляции по различным маршрутам движения, зависимости скорости и мгновенного расхода топлива от времени, были объединены в один набор данных. Для обеспечения непрерывности временной шкалы, временные метки последующих маршрутов корректируются. Результат представлен на рис. 1, где виден фрагмент объединения маршрутов. Учитывая, что цикл *UDC* состоит из четырех идентичных фаз регламента Европейской экономической комиссии № 15 (*Economic Commission for Europe Regulation № 15, ECE-15*), было предложено увеличить его длительность за счет добавления дополнительных фаз *ECE-15*, выровняв ее с продолжитель-

ностью объединенного набора данных. Для прогнозирования скоростного профиля транспортного средства был применен метод градиентного бустинга (*Gradient Boosting*) [14]. Этот выбор обусловлен способностью эффективно улавливать нелинейные зависимости между признаками и целевой переменной (скоростью), а также устойчивостью к шумовым данным.

Модель реализована на *Python 3.7* с использованием библиотеки *scikit-learn* (*GradientBoostingRegressor*) [15] со следующими параметрами: *n_estimators*=200, *learning_rate*=0.05 и *max_depth*=5. Результаты тестирования показали высокую точность: средняя абсолютная ошибка (*Mean Absolute Error, MAE*) составила 3.32 км/ч, а коэффициент детерминации (*Coefficient of Determination, R²*) достиг значения 0.88, что подтверждает эффективность метода для реальных сценариев эксплуатации.

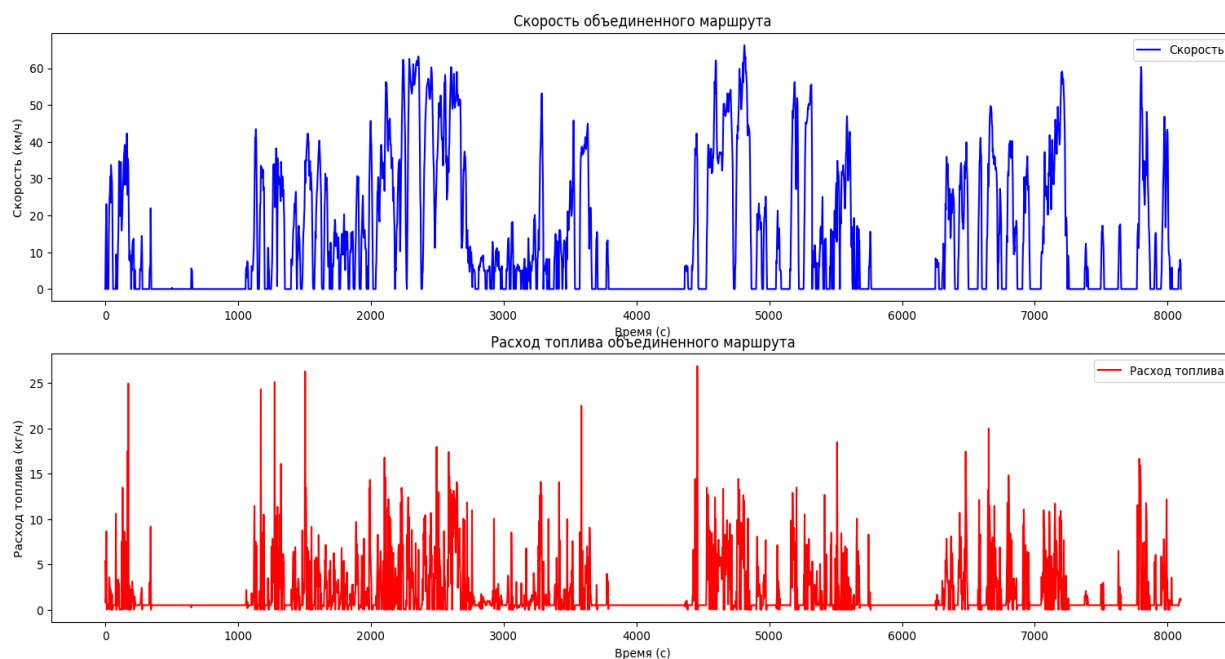


Рис. 1. Фрагмент объединения маршрутов

Fig. 1. Fragment of combining routes

В качестве признаков используются:

- время (*t*);
- расход топлива (*f*);
- ускорение (*a*);
- разница скоростей (Δv);
- разница времени (Δt);
- индикатор остановок (*I stop*).

Далее из полученного скорректированного профиля были выбраны наиболее часто встречающиеся паттерны, последовательно объединенные в цикл длиной 780 с, итоговый профиль представлен на правой части рис. 2.

Результаты

Для анализа характера движения в двух циклах были построены графики распределения скоростей с использованием оценки плотности ядра (*Kernel Density Estimation, KDE*) [14], рис. 3.

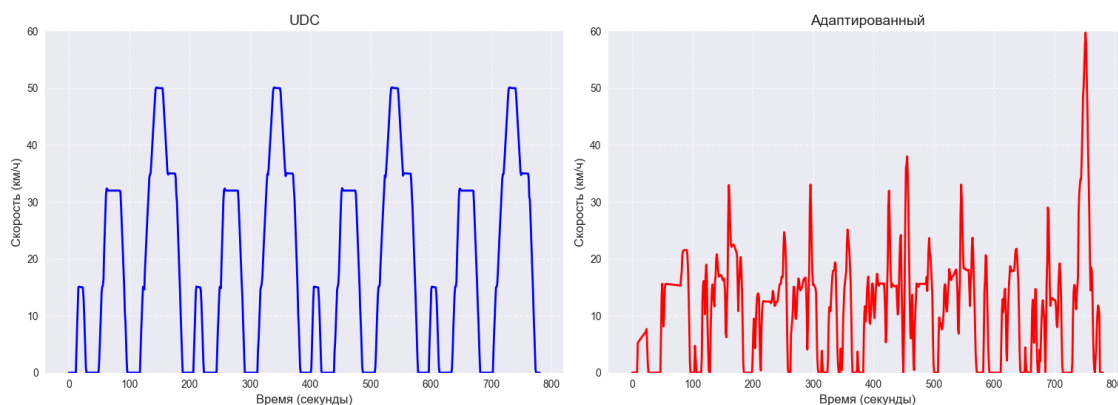


Рис. 2. Сравнение скоростных профилей цикла UDC (слева) и адаптированного цикла (справа)
Fig. 2. Comparison of the velocity profiles of the UDC cycle (left) and the adapted cycle (right)

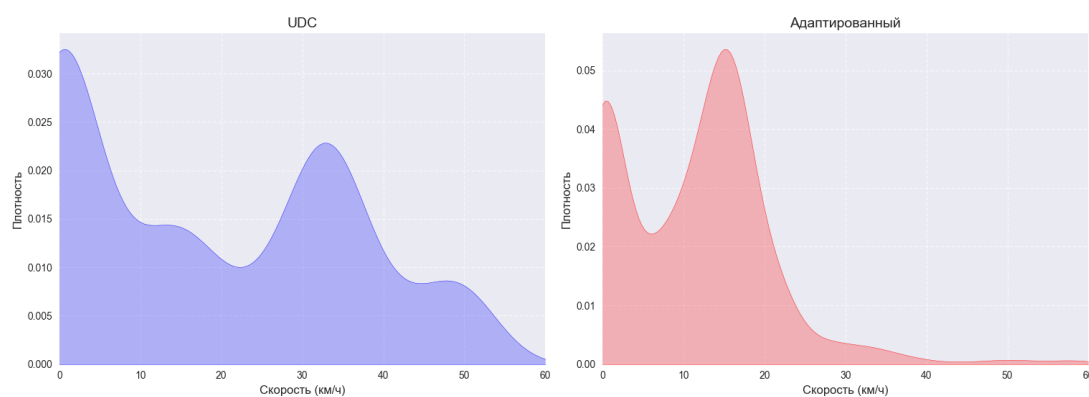


Рис. 3. Сравнение распределения скоростей для цикла UDC (слева) и адаптированного цикла (справа)

Fig. 3. Comparison of the velocity distribution for the UDC cycle (left) and the adapted cycle (right)

Для анализа характера движения в циклах были подсчитаны доли времени, затраченного на различные режимы движения: разгон, торможение, постоянную скорость и остановки (рис. 4).

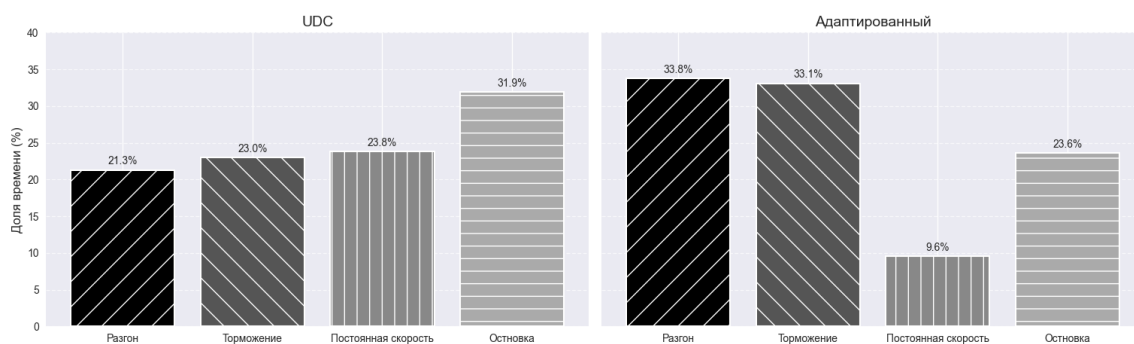


Рис. 4. Распределение режимов движения для цикла UDC (слева) и адаптированного цикла (справа)

Fig. 4. Distribution of driving modes for the UDC cycle (left) and the adapted cycle (right)

Таблица 2.
Сравнение характеристик циклов
Table 2.
Comparison of cycle characteristics

Параметр	NEDC	Адаптированный
Дистанция, м	4048	2473 (-39 %)
Средняя скорость, км/ч	18,7	11,4 (-39 %)
Максимальная скорость, км/ч	50	60 (+20 %)
Среднее ускорение, м/с ²	0,64	0,78 (+21 %)
Среднее замедление, м/с ²	-0,46	-0,72 (+56 %)
Расход топлива, л/100 км	14	19,4 (+39 %)

Далее была выполнена компьютерная симуляция в идентичных условиях. Считается, что ДВС, трансмиссия и система нейтрализации полностью прогреты. Ключевые характеристики при прохождении цикла приведены в табл. 2. Мгновенный расход топлива представлен на рис. 5.

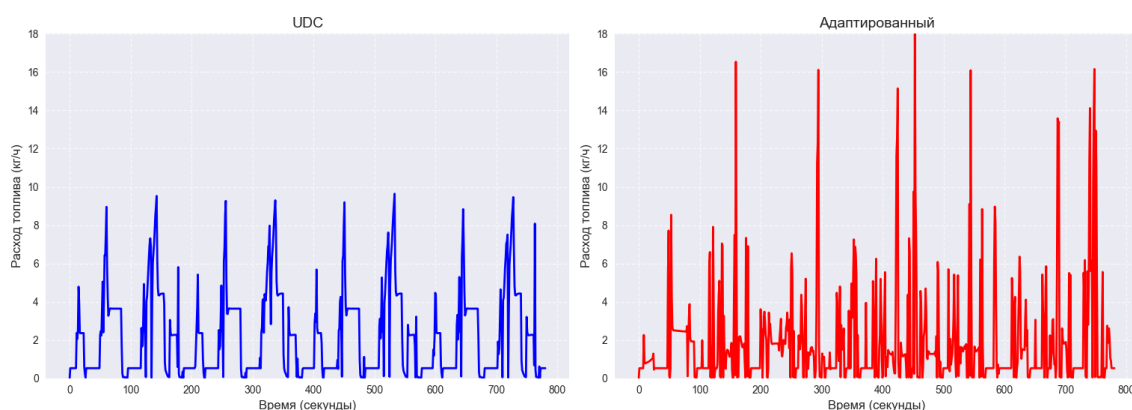


Рис. 5. Сравнение мгновенного расхода топлива для цикла UDC (слева) и адаптированного цикла (справа)

Fig. 5. Comparison of the instantaneous fuel consumption for the UDC cycle (left) and the adapted cycle (right)

На основе приведенных результатов рис. 2 и 3 можно отметить явные различия в скоростном профиле двух циклов. Адаптированный цикл демонстрирует ряд преимуществ перед UDC, что делает его более репрезентативным для реальных условий движения:

- отсутствие идентичных фаз движения и вариативность движения;
- смещение плотности распределения скоростей в диапазон 10-20 км.

Согласно данным на рис. 4, переход с UDC на скоростной профиль адаптивного цикла приводит к значительным изменениям в распределении времени нахождения автомобиля в различных режимах движения:

- увеличение разгонного режима на 12,8 %, и тормозного режим на 10,1 %, что указывает на более интенсивное и вариативное движение;
- снижение движения на постоянных скоростях на 14,2 %, что подтверждает меньшую продолжительность равномерного движения;
- сокращение время простоя на 8,3 %.

При переходе с UDC на адаптивный цикл наблюдаются следующие изменения в ключевых параметрах движения:

- средняя скорость снижается на 7,3 км/ч (-39 %);
- максимальная скорость увеличивается на 10 км/ч (+20 %);
- среднее ускорение увеличивается на 0,14 м/с² (+21 %);

- среднее замедление увеличивается на $0,25 \text{ м/с}^2$ (+56 %).

Приведенные изменения в скоростном профиле неизбежно влияют на энергетические затраты автомобиля и приводят к увеличению расхода топлива на $5,4 \text{ л/100 км}$ (+39 %). Это, в свою очередь, коррелирует с увеличением выбросов CO_2 , что согласуется с общими тенденциями перехода от *NEDC* к *RDE* и позволяет подтвердить адекватность разработанной методики, которую упрощенно можно представить на рис. 6.

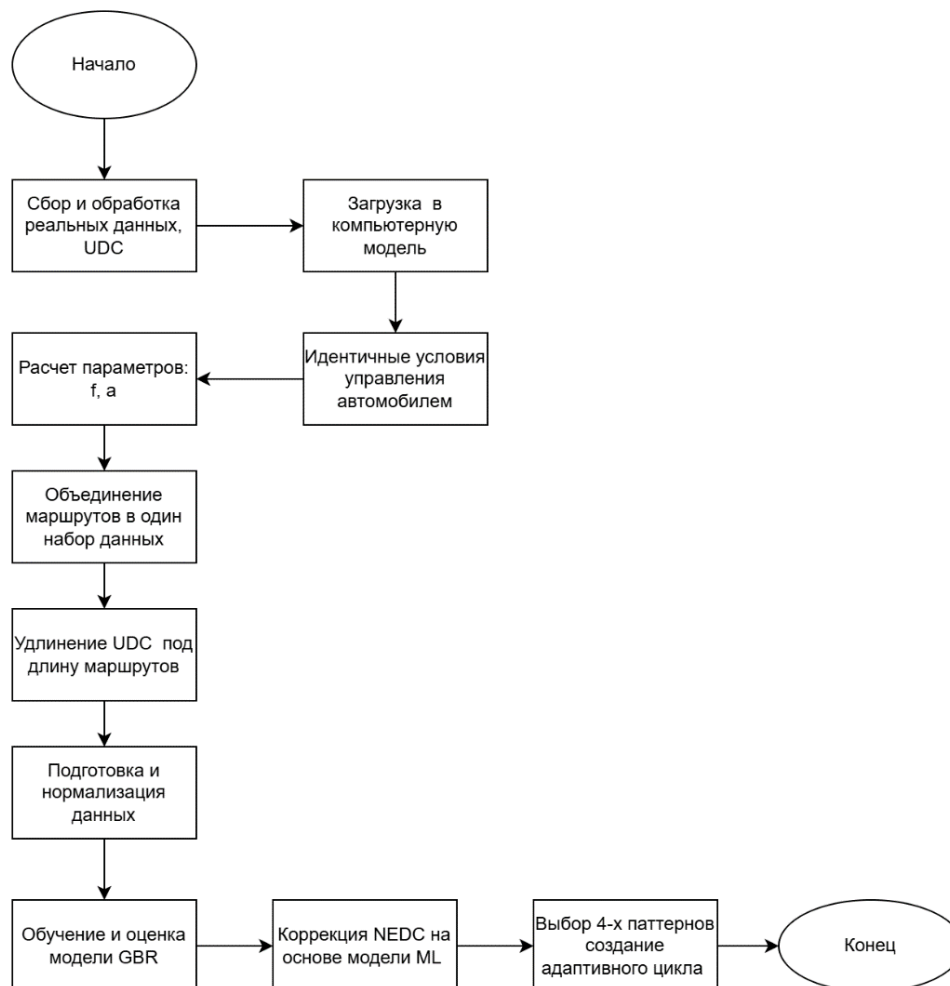


Рис. 6. Алгоритм адаптации скоростного профиля

Fig. 6. The algorithm for adapting the speed profile

Выводы

Предложенная методика обратной адаптации ездового цикла *NEDC* позволяет корректировать режимы движения со средней абсолютной ошибкой $\text{MAE} = 3.32 \text{ км/ч}$ и коэффициентом детерминации $R^2 = 0.88$, что подтверждает ее высокую точность и надежность в реальных условиях. Анализ скоростного профиля выявил следующие изменения относительно стандартного цикла: увеличились разгонный и тормозной режимы на 12,8 %, 10,1 % соответственно, уменьшилось движение на постоянных скоростях на 14,2 %, сократилось время простоя на 8,3 %. При этом средняя скорость снизилась на $7,3 \text{ км/ч}$ (-39 %), максимальная скорость возросла на 10 км/ч (+20 %), Среднее ускорение и замедление стали интенсивнее на $0,14 \text{ м/с}^2$ (+21 %) и $0,25 \text{ м/с}^2$ (+56 %) соответственно. Это приводит к увеличению расхода топлива на 39 % (до $5,4 \text{ л/100 км}$), что согласуется с данными зарубежных исследований по переходу от *NEDC* к *RDE*. Очевидна необходимость учета условий частых разгонов и торможений, и, как следствие, разработки технологий для снижения выбросов вредных веществ.

Дальнейший этап адаптации ездового цикла требует учета дополнительных факторов: температурных условий эксплуатации, стиля вождения и региональных особенностей дорожных условий. Для коммерческого транспорта важно адаптировать цикл к загородным участкам, где на высшие передачи [9, 17] приходится более 80 % пробега.

Библиографический список

1. **Савенков, Н.В.** Метод выбора передаточных чисел трансмиссии автомобиля категории N1 на основе ездового цикла // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 64-71.
2. **Thai, P.Q.** et al. Optimization of the gear ratios for a vehicle manual transmission. 2020 Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB). 2021. doi:10.1109/atigb50996.2021.94233.
3. **Oglieve, C.J.** et al. Optimisation of the vehicle transmission and the gear-shifting strategy for the minimum fuel consumption and the minimum nitrogen oxide emissions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2017. 231(7). Pp. 883-899.
4. **Giechaskiel, B.** Valverde, V.; Clairotte, M. Real Driving Emissions (RDE) 2020 assessment of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) measurement uncertainty. EUR 30591 EN. Luxemb. Publ. Off. Eur. Union, 2021. doi: [https://doi.org/ 10.2760/440720/](https://doi.org/10.2760/440720/)
5. **Valverde, V.** Emission Factors Derived from 13 Euro 6b Light-Duty Vehicles Based on Laboratory and On-Road Measurements. Atmosphere, 2019. 10. – 243 P. doi:10.3390/atmos10050243.
6. **Duraisamy, G.** et al. A comparative study on methanol/diesel and methanol/PODE dual fuel RCCI combustion in an automotive diesel engine. Renewable Energy. 2019. 145. Pp. 542-556.
7. **Tsiakmakis, S.** From NEDC to WLTP: Effect on the Type-Approval CO2 Emissions of Light-Duty Vehicles / S. Tsiakmakis et al. // Energies, 2021.
8. **Clairotte, M.** Light-Duty Vehicles Emissions Testing / M. Clairotte, V. Valverde, P. Bonnel et al. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.
9. **Огороднов, С.М.** Разработка расчетно-экспериментальной методики оценки расхода топлива при движении автомобиля по заданному маршруту / С.М. Огороднов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, С.И. Малеев // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 224.
10. **Гусаков, С.В.** Расчетно-экспериментальная методика корректировки ездового цикла для фазы движения транспортного средства в городских условиях / С.В. Гусаков, В.А. Марков, Д.В. Михрячев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 5. С. 23-30.
11. **Маняшин, С.А.** Моделирование расхода топлива автомобилями на базе ездового цикла в низкотемпературных условиях эксплуатации: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Маняшин Сергей Александрович. – Оренбург, 2013. – 18 с.
12. **Hamed, M. A.** Fuel Consumption Prediction Model using Machine Learning / M.A. Hamed, M.H. Khafagy, R.M. Badry. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2021. Vol. 12, №11. P. 406-414.
13. **Колин, А.А.** Применение имитационной модели для определения динамических и топливно-экономических свойств автомобиля / А.А. Колин, С.Э. Силантьев, П.С. Рогов, С.А. Сергиевский // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2020. № 4(131). С. 101-108.
14. **Chen T., C. Guestrin.** XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016.
15. **Pedregosa, F.** et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research. 2011.
16. **Silverman B.W.** Density Estimation for Statistics and Data Analysis. – London: Chapman and Hall/CRC, 1986. – 176 p.
17. **Бутарович Д.О.** Распределение относительных пробегов легких коммерческих автомобилей по результатам дорожных испытаний / Д.О. Бутарович, А.А. Смирнов // Журнал автомобильных инженеров. 2013. № 6 (83).

*Дата поступления
в редакцию: 08.04.2025*

*Дата принятия
к публикации: 29.06.2025*