

Научная статья

УДК 621.436-044.3:504.3.054; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-261-271

ДИАГНОСТИКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ КОНТРОЛЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ НАГРУЗКЕ

✉ Савельев Анатолий Петрович.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,
г. Саранск, Россия.

Шкрабак Владимир Степанович;

Шкрабак Роман Владимирович.

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Пушкин, Санкт-Петербург, Россия

✉ tbsap52@mail

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методов контроля технического состояния дизельных двигателей для минимизации их негативного воздействия на окружающую среду. Цель работы – обоснование параметров диагностирования дизельных силовых установок при неустановившейся нагрузке, обеспечивающих снижение выбросов парниковых газов с учетом вероятностного характера внешней нагрузки. Теоретическую основу составили методы функционального преобразования случайных величин, позволяющие оценить влияние стохастических колебаний нагрузки на выходные параметры двигателя, а также методология расчета выбросов парниковых газов на основе данных о расходе топлива. Экспериментальные исследования проведены на двигателях КамАЗ-43114. Установлены количественные значения поправочных коэффициентов для перехода от эксплуатационных допусков к диагностическим при различных уровнях неравномерности нагрузки: от 0,351–0,353 при слабых колебаниях до 0,602–0,64 при высокой неравномерности. Применение указанных коэффициентов обеспечивает снижение погрешности контроля функциональных параметров на 10–24 %. Выявлена корреляционная связь между дисперсией мощностного процесса и стабильностью работы двигателя, что позволило определить режимы диагностирования, соответствующие минимуму варибельности параметров. Для двигателя грузоподъемностью 10 т – 17,6 м/с (63,4 км/ч), для двигателя грузоподъемностью 16 т – 17,5 м/с (63 км/ч). Реализация этих режимов при диагностировании позволяет не только повысить его достоверность, но и косвенно способствует снижению углеродного следа эксплуатируемой техники. Показано, что стабилизация рабочего процесса на оптимальных режимах обеспечивает возможность снижения выбросов CO₂ в 1,55 раза по сравнению с наиболее нестабильными режимами. Научная новизна заключается в установлении взаимосвязи между вероятностными характеристиками внешней нагрузки, стабильностью работы двигателя и его экологическими показателями. Полученные результаты могут быть использованы при разработке регламентов технического обслуживания, создании автоматизированных систем контроля, а также при оценке углеродного следа автотракторной техники.

Ключевые слова: дизельный двигатель, диагностирование, экологические показатели, выбросы парниковых газов, скоростной режим, поправочные коэффициенты

Для цитирования: Савельев А.П., Шкрабак В.С., Шкрабак Р.В. Диагностика экологических показателей дизельных двигателей транспортных средств при контроле технического состояния при неустановившейся нагрузке // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 1 (77). С. 261–271. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-261-271

Scientific article

DIAGNOSTICS OF EMISSION CHARACTERISTICS OF VEHICLES DIESEL ENGINES WHEN MONITORING THE TECHNICAL CONDITION UNDER UNSTEADY LOAD

✉ Saveljev Anatoly P.

National research Mordovia state university, Saransk, Russia.

Shkrabak Vladimir S.;

Shkrabak Roman V.

Saint-Petersburg state agricultural university, Pushkin, Saint-Petersburg, Russia

✉ tbsap52@mail.ru

Abstract. The relevance of this study is determined by the need to improve methods for monitoring the technical condition of diesel engines to minimize their negative environmental impact. The aim of the work is to substantiate the diagnostic parameters for diesel power units that ensure a reduction in greenhouse gas emissions, considering the probabilistic nature of the external load. The theoretical foundation comprises methods of functional transformation of random variables, which allow assessing the influence of stochastic load fluctuations on engine output parameters, as well as a methodology for calculating greenhouse gas emissions based on fuel consumption data. Experimental studies were conducted on KamAZ-43114 engines. Quantitative values of correction coefficients for the transition from operational tolerances to diagnostic tolerances were established for various levels of load unevenness: from 0,351–0,353 under weak fluctuations to 0,602–0,64 under high unevenness. The application of these coefficients ensures a reduction in the error of monitoring functional parameters by 10–24 %. A correlation was revealed between the variance of the power process and engine operating stability, which made it possible to determine diagnostic modes corresponding to the minimum variability of parameters: for a 10-ton capacity engine – 17,6 m/s (63,4 km/h), for a 16-ton capacity engine — 17,5 m/s (63,0 km/h). Implementing these modes during diagnostics not only increases its reliability but also indirectly helps reduce the carbon footprint of the operated equipment. It is shown that stabilizing the operating cycle in optimal modes creates the potential to reduce CO₂ emissions by 1,55 times compared to the most unstable modes. The scientific novelty lies in establishing the interrelation between the probabilistic characteristics of the external load, engine operating stability, and its environmental performance. The obtained results can be used in the development of maintenance regulations, the creation of automated control systems, and in assessing the carbon footprint of automotive and tractor machinery.

Keywords: diesel engine, diagnostics, environmental performance, greenhouse gas emissions, speed mode, correction coefficients

For citation: Saveljev A.P., Shkrabak V.S., Shkrabak R.V. Diagnostics of emission characteristics of vehicles diesel engines when monitoring the technical condition under unsteady load // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 1 (77). P. 261–271. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-261-271

Введение. Состояние проблемы

Проблема контроля технического состояния дизельных силовых установок приобретает особую актуальность в связи с ужесточением требований к экологичности транспортных средств. В сельскохозяйственном производстве, где дизельные двигатели являются основным источником механической энергии, вопросы достоверности диагностирования непосредственно влияют на эффективность эксплуатации и уровень негативного воздействия на окружающую среду, в частности, на углеродный след сельскохозяйственной продукции.

Современные исследования показывают необходимость учета внешних факторов при диагностировании. Шевцова А. и А. Новиков [1] обосновали значимость учета погодноклиматических условий при оценке параметров движения. Сухов С.С. [2] показал, что эффективность систем активной безопасности напрямую связана с достоверностью диагностирования узлов и агрегатов, включая двигатель, поскольку стабильность его работы влияет на управляемость. Вместе с тем существующие методы недостаточно ориентированы на установление количественной связи между вероятностными характеристиками внешней нагрузки и итоговыми экологическими показателями, что и определило цель данной работы.

В последние годы развиваются методы количественной оценки экологического воздействия транспорта. Деянов Д.А. и Ю.В. Трофименко [3] предложили методику оценки энергопотребления и выбросов парниковых газов транспортным потоком, базирующуюся на детальной классификации транспортных средств. Донченко В.В. и В.А. Купавцев [4] подчеркнули необходимость учета параметров окружающей среды при оценке безопасности транспортных систем.

Перспективным направлением является применение искусственного интеллекта (ИИ) в диагностике. В обзоре L.F. Ineza Navugimana и соавторов [5] систематизированы подходы к использованию нейросетевых алгоритмов и обучения с подкреплением для управления двигателем. Monieta J. и L. Kasuk [6] успешно применили нейронные сети для классификации технического состояния форсунок по вибросигналам, что подтверждает эффективность ИИ в задачах неразрушающего контроля. Трофименко Ю.В. с соавторами [7] представили концепцию интеллектуального управления движением с использованием бортовых сенсоров для сбора экологических данных.

Значительный интерес представляют исследования по снижению токсичности дизелей с использованием альтернативных топлив. Chintala V. и К.А. Subramanian [8] показали, что применение водородосодержащих добавок позволяет существенно снизить выбросы оксидов азота (NO_x) и твердых частиц. Said Z. и соавторы [9] установили, что добавки диэтилового эфира и бутанола в двухтопливном ацетилен-дизельном двигателе снижают выбросы NO_x на 22–27 % и угарного газа (CO) на 34–37 %. Khujamberdiev R. и Н.М. Cho [10] в своем обзоре подтвердили, что нейросетевые модели позволяют с высокой точностью прогнозировать выбросы вредных веществ.

Отечественные исследования также вносят существенный вклад в решение проблемы. Рьжов В.А. с соавторами [11] экспериментально подтвердил, что трехфазный впрыск топлива позволяет снизить выбросы NO_x на 30 %, CO – на 70 % и дымность – на 10 %. Yousefi A. с соавторами [12] показали, что оптимизация момента впрыска запальной порции снижает выбросы метана и NO_x при сохранении топливной экономичности. Zbikowski M. и A. Teodorczyk [13] подтвердили, что методы машинного обучения позволяют реализовать адаптивные стратегии управления для сложных двухтопливных систем.

Важным направлением является совершенствование систем управления топливоподачей. Фурман В.В. с соавторами [14] разработали систему электронного управления, позволяющую гибко регулировать параметры впрыска в зависимости от режимов работы, что подтверждает связь между режимом работы и эмиссией. Wu G. с соавторами [15] представили всесторонний обзор выбросов сажи от дизельных двигателей и показали потенциал снижения выбросов за счет совершенствования рабочего процесса.

Донченко В.В. и А.Н. Шумский [16] экспериментально установили существенное влияние состава транспортного потока на скоростные режимы, что указывает на необходимость учета стохастического характера нагрузки при диагностировании. Mayer A. и соавторы [17] ввели понятие «парадигмы грязного хвоста», показав, что небольшая доля неисправных автомобилей ответственна за основную часть выбросов, что подчеркивает критическую важность диагностики.

Приведенный анализ показывает, что существующие исследования направлены на совершенствование методов диагностирования [1, 2], развитие методик оценки выбросов [3], изучение возможностей снижения токсичности дизелей [8, 9, 11, 12], применение

ИИ [5, 6, 10, 13], совершенствование систем управления [14], анализ выбросов сажи [15], учет состава транспортного потока [4, 7, 16] и выявление «автомобилей-суперзагрязнителей» [17]. При этом вопросы сопряжения результатов диагностики с оценкой экологических показателей с учетом особенностей образования токсичных компонентов в различных режимах требуют дальнейшей проработки, что обуславливает актуальность настоящего исследования.

Целью работы является обоснование параметров контроля технического состояния дизельных силовых установок, обеспечивающих снижение выбросов парниковых газов с учетом вероятностного характера внешней нагрузки.

Задачи исследования:

1. Провести анализ влияния скоростных и нагрузочных режимов на стабильность работы и, как следствие, экологические показатели дизельных двигателей.
2. Обосновать рациональные режимы диагностирования с учетом условий реальной эксплуатации.
3. Определить количественные значения поправочных коэффициентов для перехода от эксплуатационных допусков к диагностическим.
4. Выявить зависимость дисперсии диагностируемого процесса от скорости движения и определить оптимальные скоростные режимы проведения диагностического контроля.

Методы исследования

Исследование экологических показателей дизельных двигателей базировалось на комплексном подходе, сочетающем теоретическое моделирование динамических процессов и экспериментальное диагностирование. В качестве интегрального показателя экологичности выбран выброс CO_2 , поскольку он напрямую и пропорционально связан с расходом топлива, который, в свою очередь, является ключевым индикатором эффективности рабочего процесса двигателя. Это обуславливает выбор CO_2 в качестве информативного маркера при диагностировании, в отличие от токсичных компонентов (NO_x , CO , CH), образование которых зависит от более сложных и нелинейных факторов.

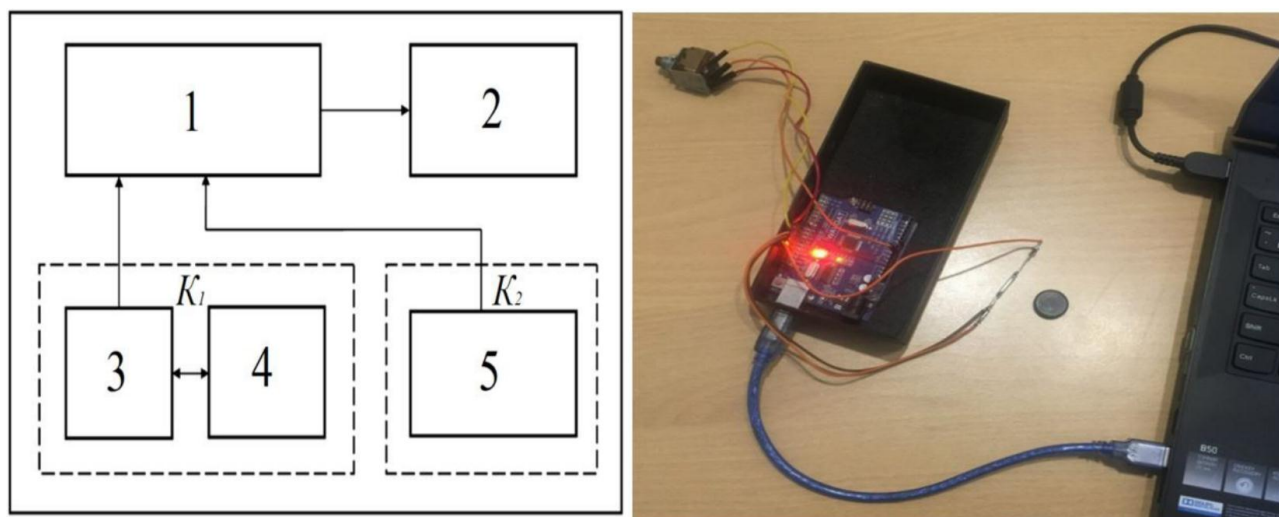
Теоретическую основу составили методы функционального преобразования случайных величин и вероятностного анализа, позволяющие оценить влияние стохастического характера внешней нагрузки на выходные параметры двигателя. Для определения математического ожидания энергетических и экологических характеристик при случайном изменении крутящего момента использовано выражение (1) [18]:

$$M(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(M_k) \varphi(M_k) dM_k,$$

где M_k – крутящий момент на валу двигателя, Н·м; $f(M_k)$ – детерминированная функция, описывающая связь исследуемого параметра с крутящим моментом, кВт; $\varphi(M_k)$ – плотность распределения вероятностей аргумента M_k , $(\text{Н}\cdot\text{м})^{-1}$.

В качестве детерминированной функции $f(M_k)$ для двигателей КамАЗ-43114 использовались экспериментально снятые регуляторные характеристики, аппроксимированные полиномиальными зависимостями второй степени. Принцип аппроксимации аналогичен подходу, подробно изложенному в работе [18] для двигателя Д-240, однако коэффициенты полиномов были определены заново для исследуемых моделей двигателей на основе стендовых испытаний.

Объектами исследования выступали дизельные двигатели семейства КамАЗ-43114 грузоподъемностью 10 т и 16 т. Экспериментальная часть работы выполнялась на базе подразделений Главного управления МЧС России по Республике Мордовия. Для сбора первичных данных использовался измерительно-регистрационный комплекс (рис. 1 а), оснащенный устройством для замера оборотов колеса (рис. 1 б), подробно описанный в авторских работах [19, 20].



а)

б)

Рис. 1. Измерительно-регистрационный комплекс:

- а – функциональная схема; б – устройство для замера оборотов колеса;
 1 – блок управления и обработки информации; 2 – персональный компьютер;
 3 – герконовый датчик оборотов колеса K_1 ; 4 – магнит на колесе;
 5 – контактная группа педали тормоза K_2

Ключевым этапом исследования стал переход от регистрируемых параметров (обороты коленчатого вала, расход топлива) к экологическим показателям. Оценка выбросов углекислого газа (CO_2) выполнялась расчетным методом на основе данных о мгновенном и суммарном расходе топлива. В основе расчета лежало уравнение материального баланса углерода, предполагающее, что практически весь углерод топлива переходит в CO_2 при полном сгорании. Использовались коэффициенты выбросов, рекомендованные для дизельного топлива применяемыми методиками [21]. Это позволило получить массивы данных, синхронизированных по времени с мощностными и скоростными параметрами работы двигателя. Для каждого скоростного режима V рассчитывался не только показатель стабильности работы двигателя (дисперсия эффективной мощности D_{Ne}), но и усредненный удельный выброс CO_2 (г/кВт·ч), что дало возможность установить между ними корреляционную связь.

Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась с применением пакета прикладных программ MatLab.

Результаты исследования и их обсуждение

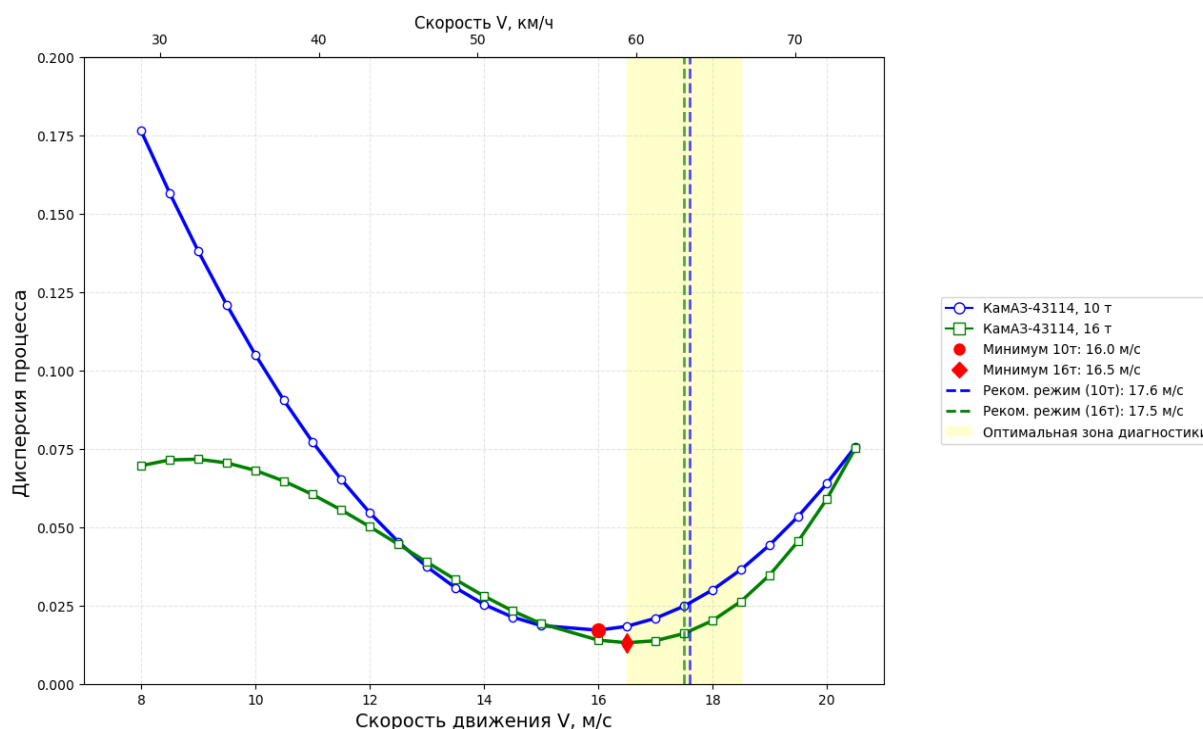
В результате проведенных исследований установлены количественные зависимости стабильности работы и экологических показателей от скоростного и нагрузочного режимов работы дизельных двигателей. Для оценки влияния технического состояния на экологические показатели определены поправочные коэффициенты, учитывающие изменение закона распределения входного воздействия при переходе от эксплуатационного допуска к диагностическому [18]. Исследования проводились при трех характерных уровнях неравномерности нагрузки, определяемых коэффициентом вариации крутящего момента: низкий уровень (слабые колебания), средний уровень (типичные условия эксплуатации), высокий уровень (значительные колебания, характерные для бездорожья). Рассчитанные поправочные коэффициенты (таблица) физически отражают переход от нормального закона распределения нагрузки (движение по трассе) к сумме гармонического и нормального процессов или закону арксинуса (движение по бездорожью с резкими колебаниями момента).

**Значения поправочных коэффициентов для определения допусков
на эффективную мощность двигателей**

Характер перехода между законами распределения нагрузки	Уровень неравномерности нагрузки		
	Низкий	Средний	Высокий
От нормального закона (Гаусса) к закону арксинуса	0,353	0,358	0,351
От нормального закона к сумме гармонического и нормального процессов	0,438	0,395	0,373
Между различными вариантами суммы гармонического и нормального процессов	0,522	0,595	0,640
От суммы гармонического и нормального процессов к закону арксинуса	0,422	0,540	0,602

Установлено, что для большинства технологических операций изменение закона распределения нагрузки вносит погрешность от 10 до 24 % при контроле функциональных параметров. Применение неустановившихся режимов диагностирования (средний уровень загрузки 0,90–0,94 от номинала; амплитуда гармонического изменения момента сопротивления 20–25 %; частота гармонического изменения 0,1–0,4 Гц) обеспечивает снижение указанной погрешности [19].

Ключевым результатом исследования является установление зависимости дисперсии эффективной мощности двигателя (D_{Ne}) от скорости движения транспортного средства (рис. 2). Полученная зависимость свидетельствует о наличии области оптимальных скоростных режимов, соответствующих наиболее стабильной работе двигателя.



**Рис. 2. Зависимость дисперсии эффективной мощности двигателя D_{Ne}
от скорости движения V для двигателей КамАЗ-43114 различной грузоподъемности**

Анализ представленных зависимостей показывает, что для двигателя КамАЗ-43114 грузоподъемностью 10 т минимальное значение дисперсии ($D_{Ne} = 0,0172$) достигается при скорости движения 16 м/с, однако с учетом условий реальной эксплуатации и обеспечения запаса устойчивости рекомендуемым следует считать режим 17,6 м/с (63,4 км/ч), при

котором дисперсия возрастает до 0,021. Выбор скорости 17,6 м/с обусловлен тем, что она, находясь в зоне минимальной дисперсии, одновременно соответствует более высокой транспортной (производительности) скорости, что предпочтительнее для реальных условий эксплуатации. Для двигателя грузоподъемностью 16 т минимальная дисперсия ($D_{Ne} = 0,0132$) наблюдается при скорости 16,5 м/с, рекомендуемое значение составляет 17,5 м/с (63,0 км/ч).

Выявленная закономерность объясняется тем, что при движении в указанном диапазоне скоростей (16,5–18,5 м/с) достигается баланс между нагрузкой на двигатель и условиями смесеобразования, что обеспечивает наиболее полное сгорание топливовоздушной смеси. Это имеет критическое значение не только для экологических показателей, но и для пожарной безопасности: неполное сгорание и связанные с ним неисправности систем питания и электрооборудования являются, согласно [22], одними из основных причин возникновения пожаров на сельскохозяйственной технике. Для подтверждения экологической значимости этих режимов обратимся к взаимосвязи между стабильностью работы двигателя и его топливной экономичностью. Как известно и подтверждено многочисленными исследованиями [8, 9, 12], режимы с наиболее полным сгоранием топлива характеризуются не только максимальной стабильностью работы, но и минимальным удельным расходом топлива. В свою очередь, снижение удельного расхода топлива напрямую ведет к пропорциональному снижению выбросов CO_2 , что является основой методик расчета углеродного следа [21].

Для подтверждения экологической значимости этих режимов выполнен анализ связи между стабильностью работы двигателя и его топливной экономичностью. На основе экспериментальных данных о расходе топлива установлено, что увеличение дисперсии эффективной мощности D_{Ne} сопровождается ростом удельного расхода топлива и, как следствие, удельных выбросов CO_2 (г/кВт·ч). Аппроксимация полученной зависимости позволила оценить абсолютные значения выбросов: для двигателя грузоподъемностью 10 т на оптимальном режиме ($V = 17,6$ м/с, $D_{Ne} = 0,021$) удельный выброс CO_2 составляет 709 г/кВт·ч, тогда как на наиболее нестабильных режимах (например, $V = 10$ м/с, $D_{Ne} = 0,06$) эта величина возрастает до 1099 г/кВт·ч. Эксплуатация двигателя на режимах, близких к оптимальным (выявленным в ходе диагностики), или своевременное устранение неисправностей, обнаруженных при диагностировании на этих режимах, позволяет снизить выбросы CO_2 в 1,55 раза по сравнению с работой на наиболее нестабильных режимах. Это значение согласуется с ранее полученным в авторском исследовании [19] коэффициентом снижения риска травмирования для того же двигателя, что косвенно подтверждает взаимосвязь между стабильностью работы, безопасностью и экологическими показателями.

Заключение

Обоснована методика определения экологических показателей дизельных двигателей при диагностировании, базирующаяся на функциональном преобразовании случайных величин. Показано, что ключевым индикатором экологической оптимальности режима является стабильность работы двигателя, количественно выражаемая через дисперсию эффективной мощности.

Установлены количественные значения поправочных коэффициентов для перехода от эксплуатационного допуска к диагностическому при различных уровнях неравномерности нагрузки (значения из таблицы). Применение указанных коэффициентов обеспечивает снижение погрешности контроля допустимых значений функциональных параметров на 10–24 %.

Определены оптимальные параметры гармонического нагружения для стендовых испытаний: средний уровень загрузки – 0,90–0,94 от номинала; амплитуда гармонического изменения момента сопротивления – 20–25 %; частота гармонического изменения – 0,1–0,4 Гц.

Экспериментально подтверждено, что диагностирование в указанных режимах повышает достоверность оценки технического состояния двигателей. Выявлена и теоретически обоснована связь между дисперсией диагностируемого процесса (эффективной мощности) и удельными

выбросами CO₂, позволяющая определить рациональные режимы проведения экологического контроля. Для двигателя КамАЗ-43114 грузоподъемностью 10 т рекомендуемый скоростной режим диагностирования составляет 17,6 м/с (63,4 км/ч), для двигателя грузоподъемностью 16 т – 17,5 м/с (63,0 км/ч).

Обосновано, что использование указанных режимов при диагностировании обеспечивает не только минимальную вариабельность контролируемых параметров, но и создает предпосылки для своевременного выявления неисправностей, устранение которых обеспечивает снижение углеродного следа эксплуатируемой техники. Для КамАЗ-43114 грузоподъемностью 10 т потенциальное снижение выбросов CO₂, обусловленное стабилизацией рабочего процесса на оптимальных режимах, может достигать снижения в 1,55 раза по сравнению с наиболее нестабильными режимами, что коррелирует с ранее установленным показателем снижения риска травмирования [19].

Список источников

1. Shevtsova A., Novikov A. Development of an approach to determination of coupling qualities of road covering using weather-climate factor // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19. № 1. P. 30–36. DOI: 10.5937/jaes0-26642
2. Сухов С.С. Предотвращение столкновения и снижения риска травмирования водителей автотранспортных средств созданием системы активной безопасности // *Вестник НЦБЖД*. 2019. № 1 (39). С. 130–134.
3. Деянов Д.А., Трофименко Ю.В. Методика оценки энергопотребления и выбросов парниковых газов транспортным потоком на улично-дорожной сети // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2024. № 3 (78). С. 68–77.
4. Донченко В.В., Купавцев В.А. Исследование элементов городской инфраструктуры для безопасного передвижения средств индивидуальной мобильности // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2023. Т. 20. № 3 (91). С. 338–349. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-338-349
5. Review of artificial intelligent algorithms for engine performance, control, and diagnosis / L.F. Ineza Navugimana [et al.] // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 3. P. 1206. DOI: 10.3390/en16031206
6. Monieta J., Kasyk L. Application of machine learning to classify the technical condition of marine engine injectors based on experimental vibration displacement parameters // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 19. P. 6898. DOI: 10.3390/en16196898
7. Трофименко Ю.В., Рунец Р.С., Буриков Е.И. Концепция интеллектуального управления движением с использованием высокоавтоматизированных транспортных средств при интеграции с инфраструктурой V2X // *Вестник Донецкой академии транспорта*. 2025. № 4. С. 94–106.
8. Chintala V., Subramanian K.A. A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 70. P. 472–491. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.247
9. Oxygenated fuels in acetylene-diesel dual fuel engine: enhancing performance and emission control / Z. Said [et al.] // *Energy*. 2025. Vol. 317. P. 134710. DOI: 10.1016/j.energy.2025.134710
10. Khujamberdiev R., Cho H. Artificial Intelligence in Automotives: ANNs' Impact on Biodiesel Engine Performance and Emissions // *Energies*. 2025. Vol. 18. № 2. P. 438. DOI: 10.3390/en18020438
11. Улучшение экологических показателей среднеоборотного дизельного двигателя путем применения трехфазной подачи топлива / В.А. Рыжов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2024. № 3 (768). С. 66–76.
12. Yousefi A., Guo H., Birouk M. An experimental and numerical study on diesel injection split of a natural gas/diesel dual-fuel engine at a low engine load // *Fuel*. 2017. Vol. 212. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.10.053

13. Zbikowski M., Teodorczyk A. Machine Learning for Internal Combustion Engine Optimization with Hydrogen-Blended Fuels: A Literature Review // *Energies*. 2025. Vol. 18. № 6. P. 1391. DOI: 10.3390/en18061391
14. Фурман В.В., Марков В.А., Плахов С.В. Система электронного управления топливоподачей газодизельного двигателя // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2023. № 1 (754). С. 52–62. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-1-52-62
15. Recent Research Progress on Black Carbon Emissions from Marine Diesel Engines / G. Wu [et al.] // *Atmosphere*. 2024. Vol. 15. № 1. P. 22. DOI: 10.3390/atmos15010022
16. Донченко В.В., Шумский А.Н. Анализ методов учета грузовых автомобилей в транспортном потоке регулируемого перекрестка // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2023. Т. 20. № 2 (90). С. 218–229. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-2-218-229
17. Nanoparticle Counting for PTI: The Dirty Tail Paradigm / A. Mayer [et al.] // *Emission Control Science and Technology*. 2025. Vol. 11. № 7. DOI: 10.1007/s40825-024-00257-0
18. Повышение достоверности диагностирования дизельных двигателей при неустановившейся нагрузке / А.П. Савельев [и др.] // *Технический сервис машин*. 2022. № 2 (147). С. 35–42. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-2-35-42
19. Савельев А.П., Белова Т.И., Старченко Е.В. Улучшение показателей безопасности функционирования сельскохозяйственных автотранспортных машин // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2022. Т. 14. № 1. С. 126–134. DOI: 10.36508/RSATU.2022.80.49.019
20. Обоснование режимов диагностирования топливной аппаратуры, работающей по принципу «Common rail» при проверке её технического состояния в стендовых условиях / А.П. Савельев [и др.] // *Техносферная безопасность – наука XXI века: материалы I Всерос. науч.-практ. конф.* Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2024. С. 41–46.
21. Углеродный след сельскохозяйственного сектора экономики республики Мордовия / А.П. Савельев [и др.] // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2022. Т. 14. № 4. С. 41–46. DOI: 10.36508/RSATU.2022.98.35.007
22. Пасовец В.Н., Лахвич В.В., Антоненко М.А. Пожары на сельскохозяйственной технике и причины их возникновения // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2021. Т. 5. № 2. С. 193–205. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.193

References

1. Shevtsova A., Novikov A. Development of an approach to determination of coupling qualities of road covering using weather-climate factor // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19. № 1. P. 30–36. DOI: 10.5937/jaes0-26642
2. Suhov S.S. Predotvrashchenie stolknoveniya i snizheniya riska travmirovaniya voditelej avtotransportnyh sredstv sozdaniem sistemy aktivnoj bezopasnosti // *Vestnik NCBZHD*. 2019. № 1 (39). S. 130–134.
3. Deyanov D.A., Trofimenko Yu.V. Metodika ocenki energopotrebleniya i vybrosov parnikovyh gazov transportnym potokom na ulichno-dorozhnoj seti // *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2024. № 3 (78). S. 68–77.
4. Donchenko V.V., Kupavcev V.A. Issledovanie elementov gorodskoj infrastruktury dlya bezopasnogo peredvizheniya sredstv individual'noj mobil'nosti // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2023. Т. 20. № 3 (91). S. 338–349. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-338-349
5. Review of artificial intelligent algorithms for engine performance, control, and diagnosis / L.F. Ineza Havugimana [et al.] // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 3. P. 1206. DOI: 10.3390/en16031206

6. Monieta J., Kasyk L. Application of machine learning to classify the technical condition of marine engine injectors based on experimental vibration displacement parameters // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 19. P. 6898. DOI: 10.3390/en16196898
7. Trofimenko Yu.V., Runec R.S., Burikov E.I. Konceptiya intellektual'nogo upravleniya dvizheniem s ispol'zovaniem vysokoavtomatizirovannykh transportnykh sredstv pri integracii s infrastrukturoj V2X // *Vestnik Doneckoj akademii transporta*. 2025. № 4. S. 94–106.
8. Chintala V., Subramanian K.A. A comprehensive review on utilization of hydrogen in a compression ignition engine under dual fuel mode // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 70. P. 472–491. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.247
9. Oxygenated fuels in acetylene-diesel dual fuel engine: enhancing performance and emission control / Z. Said [et al.] // *Energy*. 2025. Vol. 317. P. 134710. DOI: 10.1016/j.energy.2025.134710
10. Khujamberdiev R., Cho H. Artificial Intelligence in Automotives: ANNs' Impact on Biodiesel Engine Performance and Emissions // *Energies*. 2025. Vol. 18. № 2. P. 438. DOI: 10.3390/en18020438
11. Uluchshenie ekologicheskikh pokazatelej sredneoborotnogo dizel'nogo dvigatelya putem primeneniya trekhfaznoj podachi topliva / V.A. Ryzhov [i dr.] // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie*. 2024. № 3 (768). S. 66–76.
12. Yousefi A., Guo H., Birouk M. An experimental and numerical study on diesel injection split of a natural gas/diesel dual-fuel engine at a low engine load // *Fuel*. 2017. Vol. 212. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.10.053
13. Zbikowski M., Teodorczyk A. Machine Learning for Internal Combustion Engine Optimization with Hydrogen-Blended Fuels: A Literature Review // *Energies*. 2025. Vol. 18. № 6. P. 1391. DOI: 10.3390/en18061391
14. Furman V.V., Markov V.A., Plahov S.V. Sistema elektronnoho upravleniya toplivopodachej gazodizel'nogo dvigatelya // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie*. 2023. № 1 (754). S. 52–62. DOI: 10.18698/0536-1044-2023-1-52-62
15. Recent Research Progress on Black Carbon Emissions from Marine Diesel Engines / G. Wu [et al.] // *Atmosphere*. 2024. Vol. 15. № 1. P. 22. DOI: 10.3390/atmos15010022
16. Donchenko V.V., Shumskij A.N. Analiz metodov ucheta gruzovykh avtomobilej v transportnom potoke reguliruemogo perekrestka // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2023. T. 20. № 2 (90). S. 218–229. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-2-218-229
17. Nanoparticle Counting for PTI: The Dirty Tail Paradigm / A. Mayer [et al.] // *Emission Control Science and Technology*. 2025. Vol. 11. № 7. DOI: 10.1007/s40825-024-00257-0
18. Povyshenie dostovernosti diagnostirovaniya dizel'nykh dvigatelej pri neustanovivshejsya nagruzke / A.P. Savel'ev [i dr.] // *Tekhnicheskij servis mashin*. 2022. № 2 (147). S. 35–42. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-2-35-42
19. Savel'ev A.P., Belova T.I., Starchenko E.V. Uluchshenie pokazatelej bezopasnosti funkcionirovaniya sel'skohozyajstvennykh avtotransportnykh mashin // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2022. T. 14. № 1. S. 126–134. DOI: 10.36508/RSATU.2022.80.49.019
20. Obosnovanie rezhimov diagnostirovaniya toplivnoj apparatury, rabotayushchej po principu «Common rail» pri proverke eyo tekhnicheskogo sostoyaniya v stendovykh usloviyah / A.P. Savel'ev [i dr.] // *Tekhnosfernaya bezopasnost' – nauka XXI veka: materialy I Vseros. nauch.-prakt. konf. Oryol: Orlovskij gosudarstvennyj universitet imeni I.S. Turgeneva*, 2024. S. 41–46.
21. Uglerodnyj sled sel'skohozyajstvennogo sektora ekonomiki respubliki Mordoviya / A.P. Savel'ev [i dr.] // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2022. T. 14. № 4. S. 41–46. DOI: 10.36508/RSATU.2022.98.35.007
22. Pasovec V.N., Lahvich V.V., Antonenko M.A. Pozhary na sel'skohozyajstvennoj tekhnike i prichiny ih vozniknoveniya // *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi*. 2021. T. 5. № 2. S. 193–205. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.193

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 18.02.2026; одобрена после рецензирования: 02.03.2026; принята к публикации: 06.03.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 18.02.2026; approved after review: 02.03.2026; accepted for publication: 06.03.2026

Информация об авторе:

Савельев Анатолий Петрович, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), доктор технических наук, профессор, e-mail: tbsap52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8103-5787>, SPIN-код: 8068-5718

Шкрабак Владимир Степанович, профессор кафедры безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (196601, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2), доктор технических наук, профессор, e-mail: v.shkrabak@mail.ru, SPIN-код: 1017-8986

Шкрабак Роман Владимирович, заведующий кафедрой безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (196601, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2), кандидат технических наук, доцент, e-mail: shkrabakrv@mail.ru, SPIN-код: 5773-7541

Information about the authors:

Savelyev Anatoly P., professor of the department of life safety at the National research mordovian state university named after N.P. Ogarev (430005, Republic of Mordovia, Saransk, Bolshevistskaya st., 68), doctor of technical sciences, professor, e-mail: tbsap52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8103-5787>, SPIN: 8068-5718

Shkrabak Vladimir S., professor of the department of safety of technological processes and production of the Saint-Petersburg state agrarian university (196601, Pushkin, Peterburgskoe sh., 2), doctor of technical sciences, professor, e-mail: v.shkrabak@mail.ru, SPIN: 1017-8986

Shkrabak Roman V., head of the department of safety of technological processes and production of the Saint-Petersburg state agrarian university (196601, Pushkin, Peterburgskoe sh., 2), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: shkrabakrv@mail.ru, SPIN: 5773-7541