

Научная статья
УДК 629.331

Проблематика идентификации пропусков воспламенения на основании сигнала штатного датчика положения коленчатого вала

Антон Вячеславович Александров¹, Владислав Владимирович Кремнев²

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

²Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (ФГУП «НАМИ»), Москва, Россия

^{1,2}madilab@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке алгоритма определения пропусков воспламенения на основании сигнала штатного датчика положения коленчатого вала (ДПКВ). Пропуски воспламенения являются одной из основных причин ухудшения экологических характеристик двигателя, снижения динамики и топливной экономичности автомобиля, выхода из строя каталитического нейтрализатора. Своевременное их обнаружение и информирование водителя является важной и актуальной задачей.

Коленчатый вал двигателя является интегрирующим звеном, воспринимающим крутящие моменты от всех действующих сил, следовательно, его угловая скорость и ускорение отражают протекание рабочего процесса в цилиндрах. С целью оптимизации затрат на производство, для выявления нарушения сгорания логично использовать сигнал штатного датчика положения коленчатого вала с соответствующей математической обработкой. В зависимости от режима работы двигателя, пропуски воспламенения оказывают различное влияние на динамику коленчатого вала. Дополнительную сложность в решении рассматриваемой задачи оказывает смещение центра инкрементного колеса относительно оси вращения вала.

Ключевые слова: пропуски воспламенения, сигнал датчика положения коленчатого вала, динамика коленчатого вала, инкрементное колесо, эффективность работы цилиндра.

Для цитирования: Александров А.В., Кремнев В.В. Проблематика идентификации пропусков воспламенения на основании сигнала штатного датчика положения коленчатого вала // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1 (43).

Original article

Problems of identifying misfires based on the signal from the standard crankshaft position sensor

Anton V. Aleksandrov¹, Vladislav V. Kremnev²

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

²Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute, Moscow, Russia

^{1,2}madilab@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the development of an algorithm for determining ignition gaps based on the signal of a standard crankshaft position sensor. Ignition failures are one of the main reasons for the deterioration of the environmental characteristics of the engine, reduced dynamics and fuel efficiency of the car, failure of the catalytic converter. Timely detection and informing the driver is an important and urgent task. The crankshaft of the engine is an integrating link that senses torques from all acting forces, therefore, its angular velocity and acceleration reflect the flow of the working process in the cylinders. In order to optimize production costs, it is logical to use the signal of a standard crankshaft position sensor with appropriate mathematical processing to detect combustion disorders. Depending on the engine operating mode, ignition failures have a different effect on the dynamics of the crankshaft. An additional complication in solving the problem under consideration is the displacement of the center of the incremental wheel relative to the axis of rotation of the shaft.

Keywords: ignition gaps, crankshaft position sensor signal, crankshaft dynamics, incremental wheel, cylinder efficiency.

For citation: Aleksandrov A.V., Kremnev V.V. Problems of identifying misfires based on the signal from the standard crankshaft position sensor. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. No. 1 (43).

Введение. Пропуски воспламенения являются одной из основных причин ухудшения экологических характеристик автомобиля, снижения его эксплуатационных свойств и выхода из строя каталитического нейтрализатора. Своевременное обнаружение пропусков воспламенения и предупреждение об этом водителя – важная и актуальная задача.

Уход с рынка России компании Bosch – одного из основных разработчиков автомобильных блоков управления и их ПО – вызвал необходимость интенсификации отечественных разработок в этой сфере.

Коленчатый вал (КВ) ДВС является интегрирующим звеном – то есть воспринимает действие всех крутящих моментов. Соответственно, его угловое ускорение должно быть пропорционально суммарному крутящему моменту и обратно пропорционально моменту инерции вращающихся деталей, а изменение кинетической энергии подвижных деталей двигателя за какой-либо угловой (временной) промежуток должно быть равно работе внешних сил на этом промежутке [1].

Так как управление рабочими процессами ДВС происходит в функции углового положения КВ, все современные системы управления имеют в своем составе датчик его положения (ДПКВ). На основании сигнала этого датчика также рассчитывается частота вращения коленчатого вала. Для оптимизации затрат, идентификацию снижения эффективности рабочего процесса и пропусков воспламенения логично выполнять также на основании сигнала этого датчика.

Обработка сигнала ДПКВ. На рисунке 1 представлены осциллограмма сигнала штатного ДПКВ двигателя ЗМЗ-409, взаимодействующего с ИК «60-2», и результат программной конвертации этого сигнала в меандр. При обработке меандра, полученного на основании зарегистрированной осциллограммы, определяется время между двух одноименных фронтов – время прохождения зуба (T_z) [мкс]. Величина, обратная этому времени – частота вращения КВ – $1000000/T_z = n$ [мин⁻¹].

В данном случае сигнал ДПКВ оцифровывается с частотой 1 МГц, следовательно, теоретическая погрешность при определении временного интервала между фронтами составляет ± 1 мкс, что соответствует, при средней частоте вращения 4000 мин⁻¹, погрешности ± 16 мин⁻¹ [3].

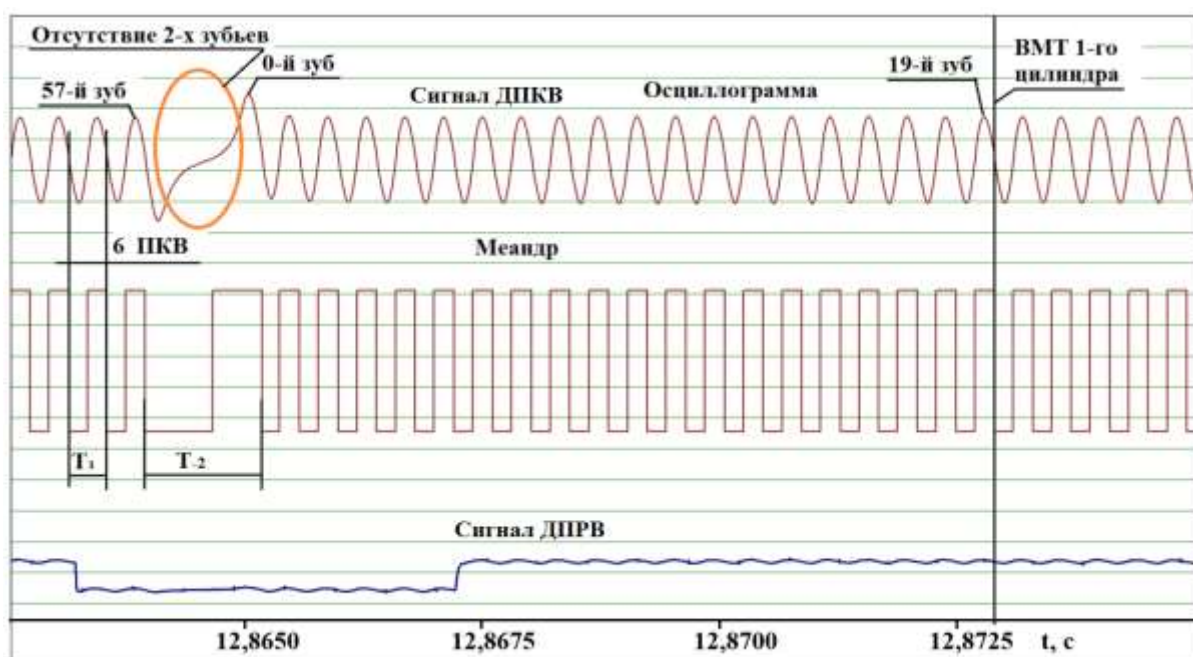


Рис. 1. Осциллограммы сигналов ДПКВ и ДПРВ

На практике, из-за неточности нарезки зубьев ИК и различных помех, частота вращения КВ на участке 6° может определяться со значительно большей погрешностью. Также на достоверность расчета угловой скорости КВ большое значение оказывает место расположения ИК. Если оно расположено вблизи маховика, то сигнал ДПКВ адекватно отражает угловую скорость КВ, а если на переднем шкиве, да еще совмещено с демпфером крутильных колебаний, то закручивание ИК относительно КВ значительно затрудняют решение этой задачи [4].

Идентификация пропусков воспламенения контроллером ЭСУД.

На рисунке 2 представлен фрагмент работы двигателя с отключенным вторым цилиндром. В верхней части первичная неотфильтрованная частота вращения, рассчитанная на угловых промежутках 6° ПКВ, совмещена с работой цифрового фильтра. После фильтрации результата первичной обработки сигнала ДПКВ, отсутствие воспламенения проявляется значимым снижением частоты вращения. Работа такого цифрового фильтра в реальном времени требует больших вычислительных мощностей, поэтому его реализация в блоке управления проблематична.

Чтобы снизить вес погрешности в определении фронтов зубьев и уменьшить влияние закручивания упругих элементов, предлагается увеличить окно измерения, в котором выполняется расчет частоты вращения КВ. При разработке методики идентификации пропусков нужно ответить на следующие вопросы:

- какова должна быть ширина окна;
- как должно быть расположено окно, чтобы получить наилучшую информативность;
- сколько окон нужно использовать для оценки эффективности рабочего процесса.

После тестирования нескольких вариантов количества, ширины и расположения окон, было принято решение использовать для оценки эффективности цикла одно окно, шириной 120° ПКВ (20 зубьев ИК). Границы окна расположены в интервале $90^\circ \dots 210^\circ$ после ВМТ начала рабочего хода оцениваемого цилиндра. В нижней части рис. 2 представлены графики средних частот вращения вала, рассчитанные в выбранном для анализа окне. Следует отметить, что эти графики состоят из отдельных точек и вне этих точек не имеют смысла. Линии, соединяющие точки, даются для удобства восприятия, а само положение точки относительно горизонтальной оси выбрано произвольно. Независимо от первообразной – график первичной, неотфильтрованной частоты вращения или результат математической фильтрации, средние скорости в выбранном окне практически совпадают. Это свидетельствует о сходимости результатов, полученных различными способами. Снижение средней частоты вращения в выбранном для анализа окне после неработающего 2-го цилиндра также хорошо отображается и на этих графиках.



Рис. 2. Результат первичной обработки сигнала ДПКВ и его фильтрация

При этом само среднее значение частоты вращения, рассчитанное в выбранном окне, не информативно – эффективность работы цилиндра – $E_{cyl}(i)$ – оценивается как отношение частоты вращения, рассчитанной для текущего окна (n_i) к частоте вращения, рассчитанной для предыдущего окна (n_{i-1}) – $E_{cyl}(i) = n_i / n_{i-1}$. Так как частота вращения – это величина, обратная времени прохождения соответствующего сегмента, в блоке управления эффективность будет рассчитываться как отношение времени предыдущего окна T_{i-1} к времени текущего T_i . Если $E_{cyl}(i) = T_{i-1} / T_i > 1$, то КВ по результату работы текущего цилиндра разгоняется.

Помимо закручивания упругих элементов и случайных погрешностей, которые сложно прогнозировать и учитывать, значительную систематическую погрешность в расчет угловой скорости вносит эксцентриситет – смещение геометрического центра ИК относительно оси вращения вала [2]. Это влияние хорошо проявляется на режиме выбега, когда сгорание отсутствует во всех цилиндрах, рис. 3 это иллюстрирует.

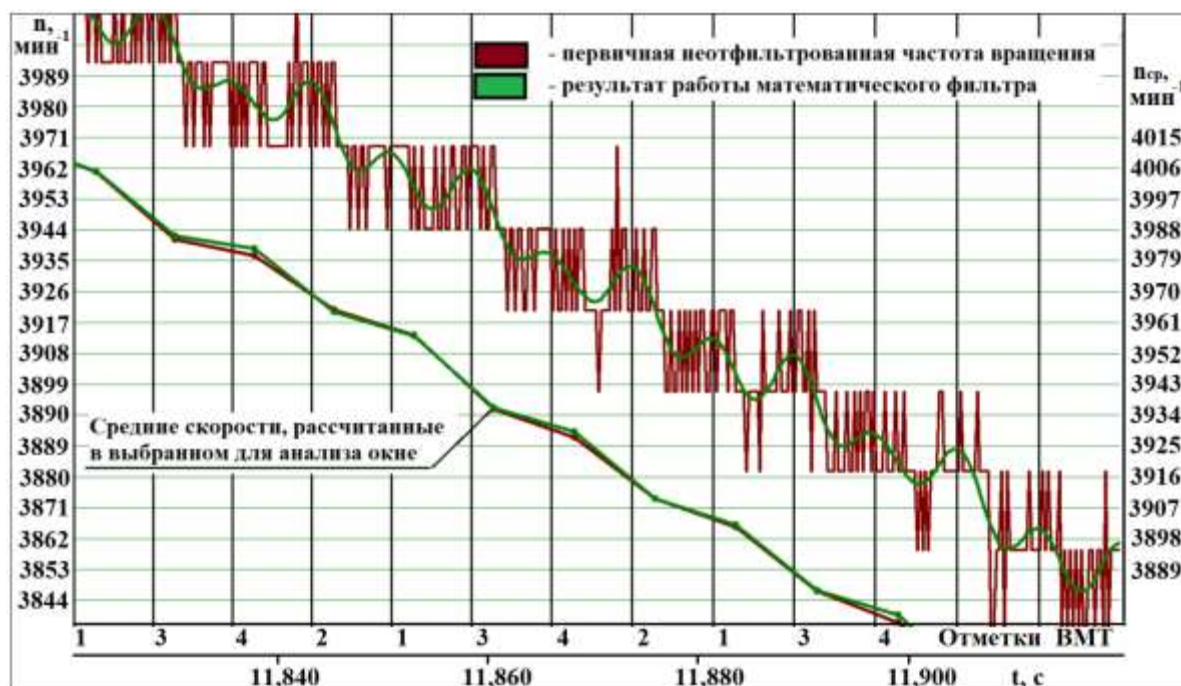


Рис. 3. Влияние эксцентриситета ИК на расчет частоты вращения коленчатого вала на режиме выбега

Вместо равномерного замедления, что соответствует физике процесса, расчеты, выполненные на основании сигнала ДПКВ, показывают ступенчатое замедление КВ. Из-за того, что ВМТ в двигателях с четным числом цилиндров совпадают – у 1 и 4 цилиндров приходится на 20 зуб ИК, а 2 и 3 цилиндров – на 50 зуб, влияние эксцентриситета на эффективность каждого из пары будет идентичным. Следует отметить, что некоторый эксцентриситет ИК имеют все двигатели, но его величина и фаза для каждого индивидуальны.

Компенсация эксцентриситета ИК. Для компенсации влияния эксцентриситета был предложен алгоритм, реализуемый на режиме выбега – рис. 4. Последовательность действий в предлагаемом алгоритме:

Шаг 1 – рассчитывается частота вращения КВ на выбранных для этого сегментах (окнах).

Шаг 2 – рассчитываются эффективности работы цилиндров – $E_{cyl(i)}$, как отношение средних частот вращения в соседних окнах – $n_{тек} / n_{пред}$ или $T_{пред} / T_{тек}$.

Шаг 3 – рассчитывается средняя эффективность – $E_{\text{сред}}$, как среднее арифметическое нескольких соседних значений эффективности. В данном примере взято 8 значений – 3 влево и 4 вправо относительно текущего цилиндра. Этот параметр отражает среднюю динамику – на выбеге КВ замедляется, поэтому средняя эффективность ниже 1 (на рисунке около 0,997).

Шаг 4 – рассчитываются корректирующие коэффициенты для каждой пары цилиндров. При делении средней эффективности на эффективность текущего цилиндра получается индивидуальный коэффициент – $ke_ex(i) = E_{\text{сред}} / E_{\text{cyl}}(i)$.

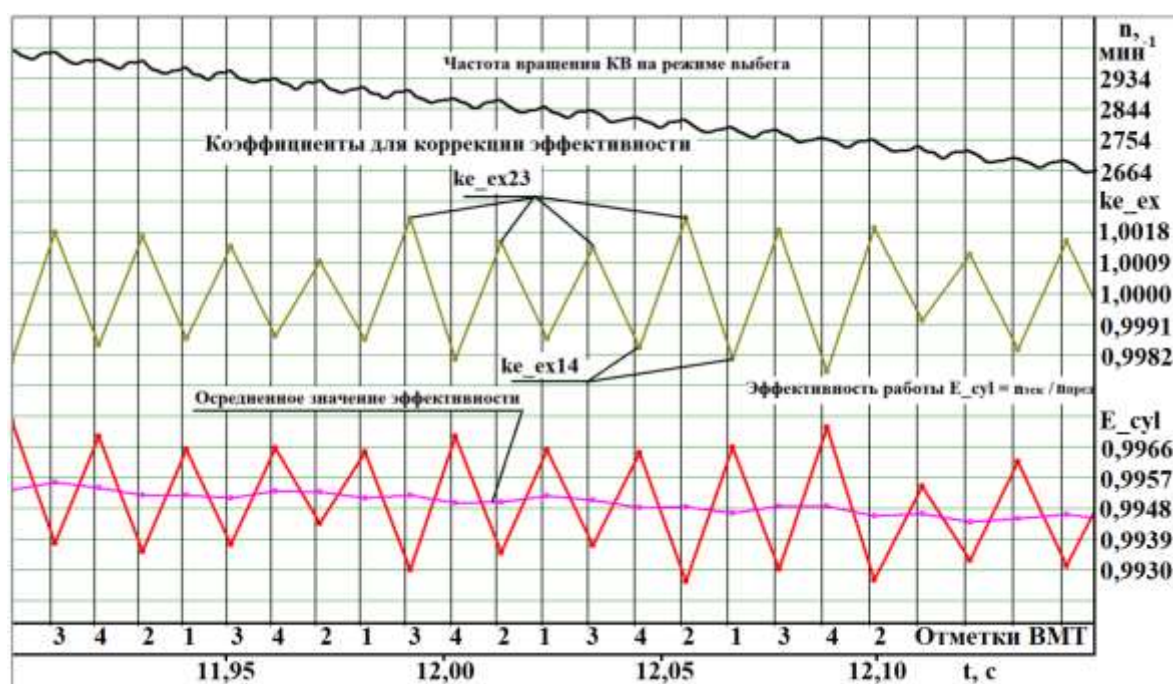


Рис. 4. Расчет коэффициентов коррекции ИК для двигателя ЗМЗ-409 на режиме выбега

Для данного двигателя для 1 и 4 цилиндров этот коэффициент в среднем равен 0,9982, для 2 и 3 – 1,0018. В процессе эксплуатации эти коэффициенты должны рассчитываться на выбеге и обновляться через ЕМА-фильтр. Режим выбега при движении автомобиля реализуется в момент переключения на повышенную передачу.

Далее следует проверить актуальность этих найденных коэффициентов – ke_{ex14} и ke_{ex23} , рассчитанных на режиме выбега, для нагрузочных режимов, где и требуется осуществлять контроль пропусков воспламенения.

На рисунке 5 представлен плавный свободный разгон двигателя ЗМЗ-409 с неработающим вторым цилиндром – низкий крутящий момент и высокая частота вращения является «неудобным» для определения пропусков воспламенения.

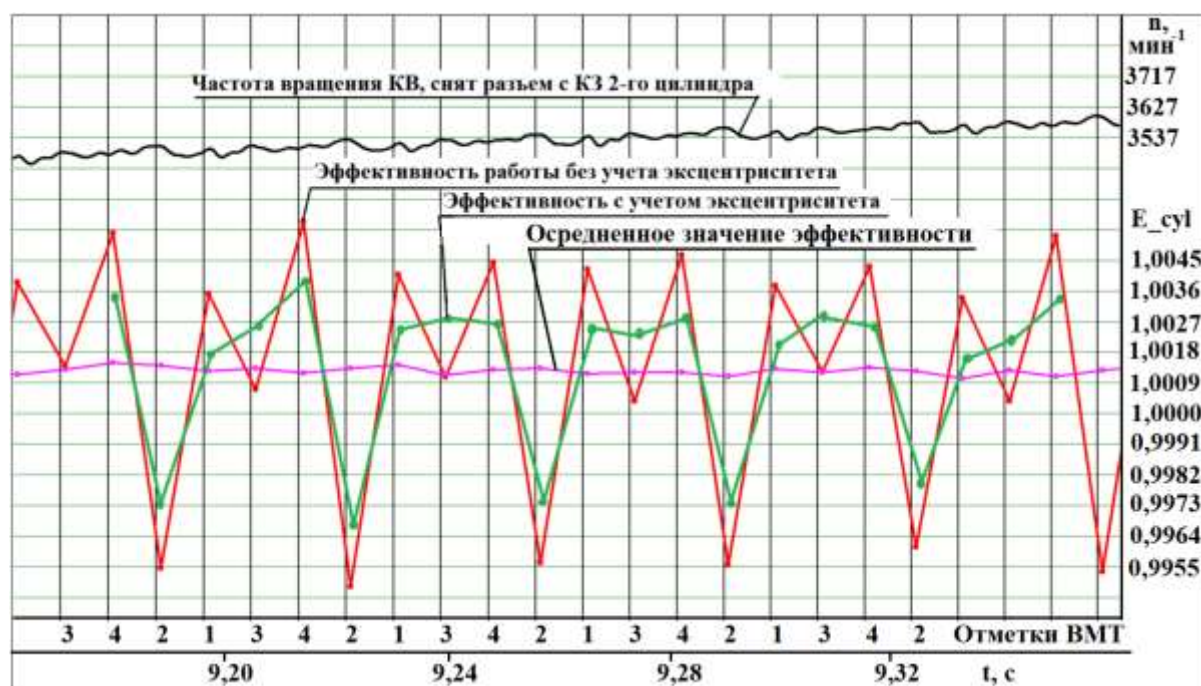


Рис. 5. Коррекция эффективности работы цилиндров с учетом эксцентриситета.
Свободный разгон двигателя УАЗ с отключенным 2-м цилиндром

После домножения значений фактической эффективности на найденные корректирующие коэффициенты, эффективность работающих цилиндров практически сравнялась, а неработающего значимо от них отличается.

Анализ факторов, влияющих на эффективность работы цилиндра, определяемую на основании частоты вращения при отсутствии сгорания. Для идентификации пропусков воспламенения нужно выработать диагностический критерий – $E_{гран}$ – какое снижение эффективности считать пропуском воспламенения. Для всех двигателей и всего поля режимов

работы единое значение выбрать невозможно. Снижение эффективности, которое следует считать пропуском воспламенения зависит от следующих факторов:

1. Количество цилиндров – чем меньший угловой интервал будет между рабочими ходами в соседних цилиндрах, тем меньше снизится частота вращения при пропуске воспламенения в одном цилиндре, следовательно, $E_{\text{гран}}$ будет больше.

2. Частоты вращения КВ – чем выше частота вращения, тем меньше будет ее снижение в результате пропуска воспламенения;

3. Нагрузки на двигатель – чем меньше генерируемый двигателем крутящий момент, тем меньше будет момент, тормозящий КВ, и меньше снижение частоты вращения в случае пропуска сгорания.

4. Общего тренда частоты вращения КВ – если автомобиль замедляется, и частота вращения снижается, то и при нормальной работе эффективность работы цилиндра будет меньше единицы. Таким образом для сравнения с граничным значением следует использовать не абсолютную, а относительную эффективность работы цилиндра;

5. При работе на ХХ эффективность зависит от запрашиваемого крутящего момента – если запрашиваемый момент ниже среднего, то и эффективность цикла будет меньше единицы, следовательно, $E_{\text{гран}}$ нужно будет домножать на поправочный коэффициент.

6. Индивидуальные особенности двигателя – при одном и том же запрашиваемом крутящем моменте нормальное протекание рабочего процесса в различных цилиндрах может отражаться различным изменением частоты вращения, следовательно, для отслеживания не только пропусков воспламенения, но критического снижения эффективности нужно предусмотреть адаптивный механизм коррекции границы эффективности.

При реализации алгоритма идентификации пропусков воспламенения в ПО контроллера ЭСУД были учтены все выше обозначенные факторы

влияния. В зависимости от количества цилиндров выбираются ширина и расположение сегмента, на котором происходит расчет угловой скорости.

Граница, выход за которую считается пропуском воспламенения, является калибруемым параметром в функции частоты вращения и нагрузки.

Выводы

1. Сигнал ДПКВ информативен для контроля протекания рабочего процесса в цилиндрах двигателя и практически не имеет альтернативы среди штатных датчиков СУ ДВС.
2. В зависимости от места расположения ИК, на основании сигнала ДПКВ можно контролировать не только отсутствие пропусков воспламенения, но и относительную, и даже абсолютную эффективность протекания рабочего процесса.
3. При составлении алгоритмов бортовой диагностики большое значение имеет вычислительная мощность контролера ЭСУД. Наличие свободной мощности дает возможность анализировать изменение параметров управления и отклика на них со стороны ДВС, накапливать эти данные на протяжении всего периода эксплуатации автомобиля. Это позволяет реализовывать алгоритмы прогностической диагностики – прогнозирование времени выхода компонентов двигателя за допустимые рамки.

Список источников

1. Морозкин, Т.В. Исследование корреляции крутящего момента от газовых сил и динамики вращения коленчатого вала на различных режимах работы ДВС: специальность: 13.04.03: дис. ... магистра / Морозкин Т.В.; МАДИ. – Москва, 2020. – 81 с.
2. Долгов, И. А. Актуальность индицирования ДВС / И. А. Долгов, А. В. Александров // Журнал автомобильных инженеров. – 2016. – № 5(100). – С. 19-23. – EDN YRKCCJ.
3. Долгов, И. А. Мобильный комплекс для регистрации и обработки параметров работы автомобильного двигателя / И. А. Долгов, А. В. Александров // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 2(103). – С. 11-17. – EDN YQFRLV.
4. Александров, А. В. Индицирование двигателя на переходных режимах / А. В. Александров, Т. В. Морозкин // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы

развития автотранспортного комплекса : Сборник трудов Международной научно-технической конференции, Москва, 31 января 2019 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2019. – С. 270-282. – EDN QEVTGF.

References

1. Morozkin T.V. Issledovanie korrelyacii krutjashhego momenta ot gazovyh sil i dinamiki vrashhenija kolenchatogo vala na razlichnyh rezhimah raboty DVS (Investigation of the correlation of torque from gas forces and the dynamics of rotation of the crankshaft in various operating modes of the internal combustion engine), Master's thesis, Moscow, MADI, 2020, 81 p.
2. Alexandrov A.V., Dolgov I.A. Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov, 2016, no.№ 5(100), pp. 19-23.
3. Alkexandrov A.V., Dolgov I.A. Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov, 2017, no 2 (103), pp. 11-17.
4. Alexandrov A.V., Morozkin T.V. 8-e Lukaninskie chtenija. Problemy i perspektivy razvitija avtotransportnogo kompleksa. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Moscow, 2019, pp. 270-282.

Рецензент: А.Ю. Дунин, д-р техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Александров Антон Вячеславович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Кремнев Владислав Владимирович, аспирант, ФГУП НАМИ.

Information about the authors

Aleksandrov Anton V., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Kremnev Vladislav V., postgraduate, FSUE NAMI.

Статья поступила в редакцию 16.02.2025; одобрена после рецензирования 17.02.2025; принята к публикации 25.03.2025.

The article was submitted 16.02.2025; approved after reviewing 17.02.2025; accepted for publication 25.03.2025.