

УДК 629.1.05

А. Л. Манаков, А. С. Алехин

Применение комплексного интегрального показателя для оценки технического состояния ДВС

Современные тенденции двигателестроения в первую очередь представляют собой стремление повысить эксплуатационные и технические характеристики двигателей внутреннего сгорания, такие как снижение удельного расхода топлива, снижение показателей токсичности отработавших газов, повышение мощности двигателей внутреннего сгорания.

Основным способом достижения перечисленных выше показателей является внедрение электронных систем управления, которые в настоящее время обретают функции самообучения и диагностики. Однако, несмотря на все положительные качества электронных систем управления, разработчики предлагают использовать для диагностирования двигателей устройства, предназначенные только для своего продукта, зачастую стоимость подобных систем достаточно высока. По этой причине разработка универсальных диагностических комплексов является актуальной. Стоит учитывать особенности парка транспортных и технологических машин нашей страны, где одновременно могут эксплуатироваться двигатели различных поколений, среди которых массово применяются дизельные двигатели с механическими системами управления топливоподачей и постепенно вводятся в эксплуатацию двигатели с электронными системами управления топливоподачей и рабочими процессами.

Наиболее информативными показателями, свидетельствующими о техническом состоянии ДВС, являются величины крутящего момента и мощности, так как эти показатели являются комплексными. Однако измерение крутящего момента является сложной задачей, для решения которой требуется дорогостоящее оборудование, а для некоторых типов техники и вовсе невозможно произвести измерение развиваемого крутящего момента. Наряду с крутящим моментом и мощностью, комплексным параметром является угловое ускорение коленчатого вала, которое может быть измерено на свободном хвостовике коленчатого вала двигателя при различных режимах работы, в том числе на холостом ходу при минимальной частоте вращения.

Ключевые слова: *диагностирование, двигатель внутреннего сгорания, угловое ускорение, коленчатый вал.*

В настоящее время в нашей стране происходят существенные изменения в законодательных актах относительно экологических показателей энергетических установок, применяемых как на наземных машинах, так и на судах различного назначения. В первую очередь это связано с появлением двигателей внутреннего сгорания, которые обладают лучшими экологическими показателями в сравнении с эксплуатируемыми в настоящее время. Применяются новые системы управления топливоподачей, нейтрализации отработавших газов и другие, которые требуют проведения диагностирования с помощью специальных комплексов, состоящих из электронных сканирующих устройств и оборудования для настройки и проверки механических систем [1].

Основу ДВС транспортных машин составляют двигатели, имеющие механические системы управления топливоподачей. Сложностей, возникающих при их диагностировании, практически нет, так как эти двигатели были разработаны отечественными предприятиями. Напротив, определение технического состоя-

ния (ТС) импортных двигателей внутреннего сгорания с электронным управлением рабочим процессом, которые все чаще устанавливаются на выпускаемые отечественной промышленностью машины, является сложной задачей.

Согласно проведенным исследованиям, наибольшее число отказов двигателей внутреннего сгорания связано с неисправностями топливной аппаратуры и естественным износом цилиндропоршневой группы, диагностическим параметром оценки которых может быть снижение мощности. Диагностирование перечисленных выше элементов чаще всего проводится по известным косвенным признакам без разборки двигателя [2].

Некоторые методики оценки технического состояния безразборным, бестормозным способом имеют ряд недостатков: использование номограмм (полученных на заводе-изготовителе экспериментальным путем) для каждой модели ДВС; необходимость калибровки измерительной аппаратуры для каждого исследуемого двигателя.

Исходя из вышесказанного, существует потребность в разработке программно-измерительного комплекса для общей оценки технического состояния дизельных двигателей с электронным и механическим управлением топливоподачей. Для разработки диагностического комплекса необходимо использовать математическую обработку большого массива данных с датчика угловых перемещений, результатом которой будут зависимости углового ускорения коленчатого вала ДВС, характеризующего изменение крутящего момента [3], развиваемого на коленчатом валу двигателя от каждого из цилиндров, от угла поворота.

Предложено оборудование и программа «Анализатор характеристики вращательного движения 1.8.0» [4], использующие сигналы высокоточного датчика (360 отметок на один оборот вала датчика) с последующей обработкой данных. Основным элементом диагностического комплекса является оптический инкрементальный энкодер [5]. Алгоритм вычисления угловой скорости ω и углового ускорения ε представляет собой обработку массива данных в виде значений напряжения в каждой метке датчика с привязкой ко времени прихода этого напряжения, необходимых для проведения дальнейших вычислений. Приведенный вычислительный алгоритм можно представить в виде зависимостей величины напряжения от времени (рис. 1).

На рисунке показаны сигналы, соответствующие прохождению светового потока через открытое окно датчика, при этом програм-

мно фиксируется значение напряжения переднего фронта каждого из 360 сигналов энкодера [6]. Согласно значениям времени по массиву меток с привязкой к сигналу от датчика верхней мертвой точки вычисляются величины, характеризующие вращение коленчатого вала при совершении рабочих тактов, такие как угловая скорость и угловое ускорение.

Известно, что крутящий момент, развиваемый двигателем, представляет собой зависимость от угла поворота коленчатого вала (рис. 2) и выражается формулой

$$T_{кр} = T_c + I d\omega/dt, \quad (1)$$

где T_c – момент от сил сопротивления; I – момент инерции; $d\omega/dt$ – угловое ускорение коленчатого вала.

Величина углового ускорения коленчатого вала является функцией, характеризующей изменение крутящего момента в каждом из цилиндров, и будет пропорциональна тангенциальной силе, воздействующей на шатунную шейку.

В режиме условно установившегося холостого хода ($\omega \neq \text{const}$) величина среднего значения углового ускорения коленчатого вала будет характеризовать наличие сопротивлений при вращении коленчатого вала, т. е. при значительном отклонении $\Delta\varepsilon$ средней линии углового ускорения от линии нулевого значения при работе двигателя наблюдаются избыточные сопротивления, не связанные с протеканием процессов холостого хода [7]. Подобные сопротивления могут быть вызваны неисправностью одного из цилиндров двигателя

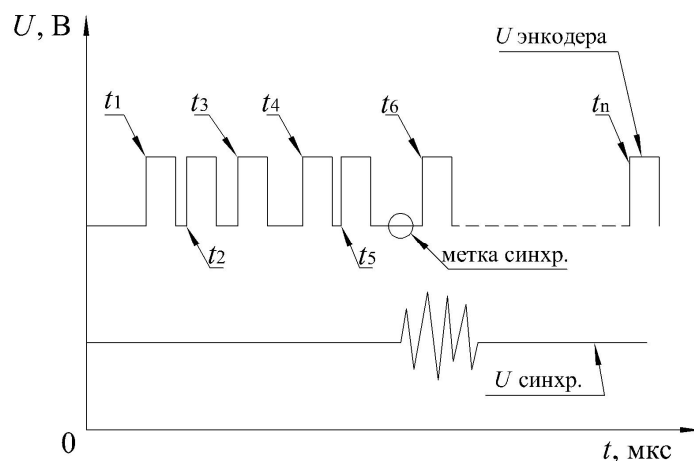


Рис. 1. Зависимости напряжения инкрементального энкодера от времени

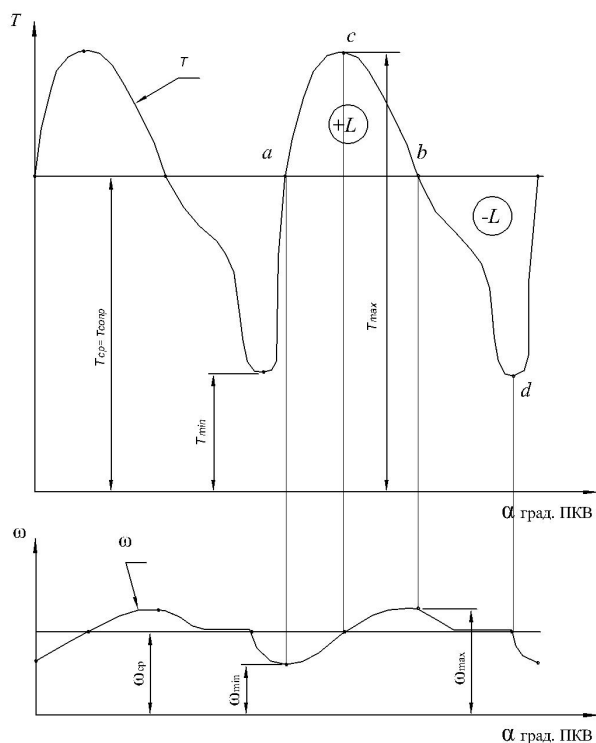


Рис. 2. Зависимость крутящего момента и угловой скорости от угла поворота коленчатого вала

(чаще при неисправности топливной аппаратуры) или наличием дополнительных сопротивлений (насосные потери, трение и др.).

Для проверки гипотезы об изменении значения средней линии углового ускорения при внесении неисправности в ходе работы ДВС на минимально устойчивом холостом ходе был проведен эксперимент с измерениями мощности и углового ускорения коленчатого вала ε ДВС. Измерение мощности ДВС [8] производилось на индуктивном роликовом мощностном стенде Cartec LPS 2020, где в качестве испытуемого образца использовалось шасси автомобиля с двигателем ВАЗ 2101. В качестве имитированной неисправности производилось выключение из работы одного или нескольких цилиндров [9]. Результаты измерений сведены в таблицу.

График зависимости величины углового ускорения от времени работы в течение одного полного цикла двигателя ВАЗ 2101 представлен на рис. 3.

На приведенном графике показано отклонение $\Delta\varepsilon$ в случае неисправности одного из цилиндров двигателя. Согласно проведенным испытаниям по измерению мощности четырехцилиндрового четырехтактного двигателя выявлено, что потеря мощности при отсутствии воспламенения в одном из цилиндров снижает величину общей мощности агрегата на 38 %, а величина отклонения ε от нулевой линии составляет 100 рад/с². В случае же исправного технического состояния отклонение $\Delta\varepsilon$ стремится к нулю. К тому же при наличии отметки о начале рабочего цикла имеется возможность идентификации цилиндра, обладающего наименьшей мощностью. Методика расчета отклонения $\Delta\varepsilon$ представлена в виде формулы

$$\Delta\varepsilon = \left(|\varepsilon_1^+| - |\varepsilon_1^-| + |\varepsilon_2^+| - |\varepsilon_2^-| + |\varepsilon_n^+| - |\varepsilon_n^-| \right) / n = \sum_{i=1}^n \left(|\varepsilon_i^+| - |\varepsilon_i^-| \right) / n, \quad (2)$$

Результаты измерений мощности ДВС и углового ускорения двигателя ВАЗ 2101

Количество участвующих в работе цилиндров и порядок работы	Измеренная мощность ДВС, кВт	Измеренное угловое ускорение ε , рад/с ²		Отклонение $\Delta\varepsilon$, рад/с ²
		max	min	
4 (1-3-4-2)	38,2	164	162	2
3 (х-3-4-2)	23,6	440	240	100

где $|\varepsilon_i^+|$ – величина положительного ускорения ε от i -го цилиндра; $|\varepsilon_i^-|$ – величина отрицательного ускорения ε от i -го цилиндра; n – количество цилиндров.

Следует отметить, что тенденции современных производителей дизельных двигателей направлены на производство ДВС с электронными системами управления топливоподачей и контроля протекающих процессов посредством датчиков. Приведенный способ будет актуальным при проведении общей оценки техниче-

ского состояния [10] в ходе диагностирования и позволит определить наличие неисправности, из-за которой цилиндром не совершается положительная работа. Однако по причине быстрого действия системы управления оценка ТС по приведенной методике сводится к оценке абсолютных значений углового ускорения ε для каждого из цилиндров двигателя (рис. 4). Испытания проводились на двигателе Caterpillar C7 асерт (с технологией дифференцированного давления впрыска и электрического управления объема впрыскиваемого топлива).

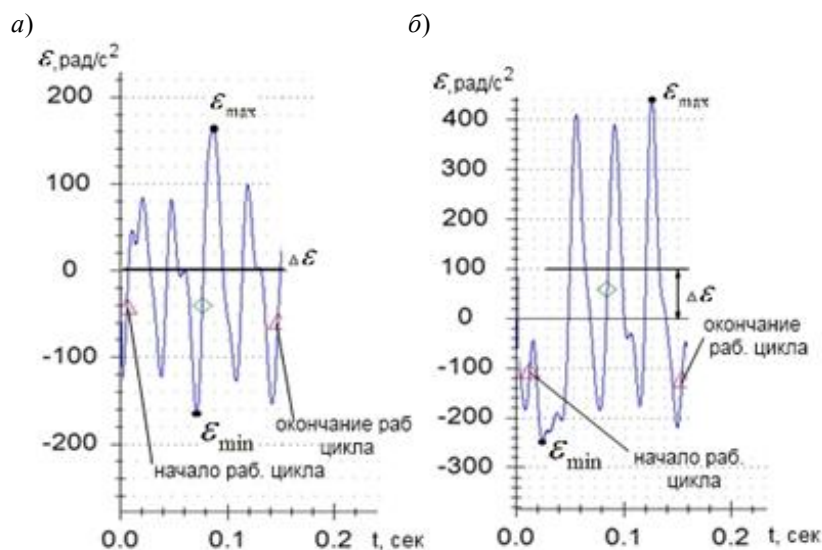


Рис. 3. График зависимости величины ε от времени работы с указанием отклонения $\Delta\varepsilon$ от величины нулевой линии при исправном состоянии двигателя ВАЗ 2101 (а) и внесенной неисправности первого цилиндра (б)

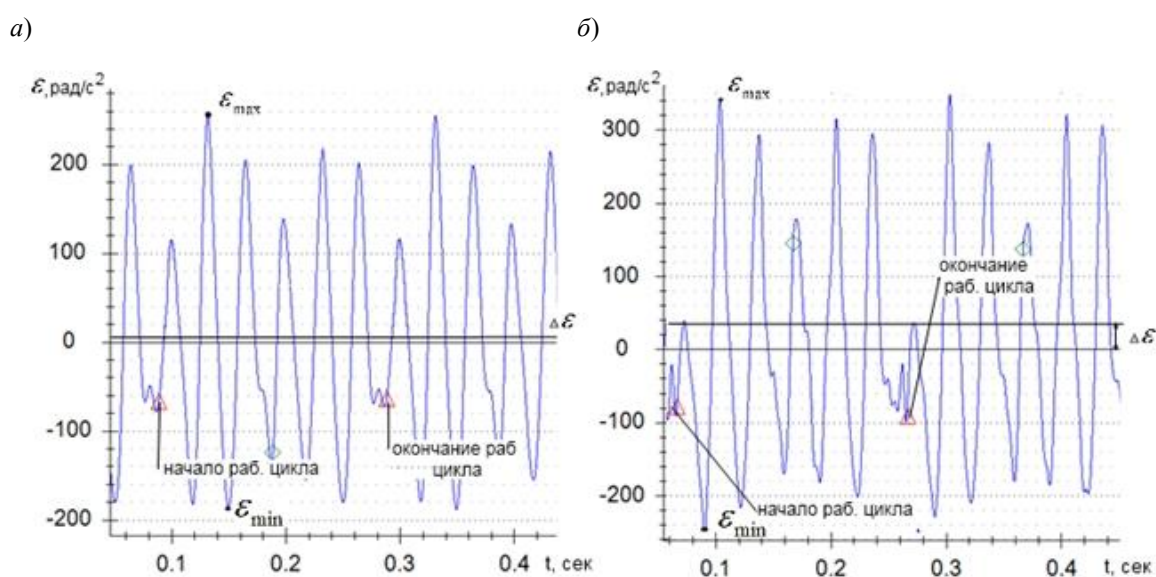


Рис. 4. График зависимости величины ε от времени работы с указанием отклонения $\Delta\varepsilon$ от величины нулевой линии при исправном состоянии двигателя Caterpillar (а) и внесенной неисправности первого цилиндра (б)

Таким образом, имеется возможность производить оценку технического состояния двигателя внутреннего сгорания в условиях эксплуатации, а также можно использовать предложенный метод при настройке топливной аппаратуры некоторых дизелей для обеспечения равенства силы, действующей на поршень, и, как следствие, крутящих моментов. Своевременное обнаружение дефектов при работе газов, совершаемой в цилиндрах, позволит оперативно выполнить корректировку работы ДВС или назначить углубленное диагностиро-

вание и ремонт. Предложенные методы диагностирования по приведенному алгоритму могут быть использованы для оценки ТС двигателей внутреннего сгорания как с принудительным воспламенением, так и с воспламенением от сжатия, а диагностический показатель – угловое ускорение ($\Delta\epsilon$ или абсолютное значение) коленчатого вала – обладает необходимыми диагностическими признаками: однозначностью, чувствительностью, стабильностью, информативностью.

Библиографический список

1. Двигатели внутреннего сгорания: В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин и др.; Под ред. В. Н. Луканина. М.: Высш. шк., 1995. 368 с.
2. Глушков С. П., Барановский А. М., Глушков С. С. Автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс для регистрации крутильных колебаний энергетических установок БАГС-4 // Сибирский научный вестник. 2006. Вып. 9. С. 109–112.
3. Манаков А. Л., Алехин А. С., Ижбулдин Е. А. Методика определения эффективной работы ДВС // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 8. URL: http://journals.istu.edu/_sys/mod/attach.php?journals/2015/08/08_2015.pdf (дата обращения: 10.08.2017).
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618981. Программа для получения характеристик вращательного движения валов / Алехин А. С., Кочергин В. И., Манаков А. Л., Пятин С. П., Фадеев В. Ю. № 2013660804; заявл. 03.10.2013; рег. 19.11.2013.
5. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
6. Колчин А. В. Датчики средств диагностирования машин. М.: Машиностроение, 1984. 120 с.
7. Кочергин В. И., Алехин А. С. Оценка технического состояния систем автоматического регулирования частоты вращения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2014. С. 286–289.
8. Кушвид Р. П. Испытания автомобиля: Учеб. М.: МГИУ, 2011. 351 с.
9. Диагностика и техническое обслуживание машин: Учеб. для студентов высш. учеб. заведений / А. Д. Ананьин, В. М. Михлин, И. И. Габитов и др. М.: Академия, 2008. 432 с.
10. Викулов С. В. Основы технической диагностики судовых дизелей по комплексу параметров работающего моторного масла. Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2011. 176 с.

A. L. Manakov, A. S. Alekhin

The Complex Integrated Indicator Application for Assessing the ICE Technical Condition

Abstract. Modern tendencies of engine building are first of all an aspiration to increase operational and technical characteristics of internal combustion engines, such as: reduction of specific fuel consumption, reduction of exhaust gases toxicity, increase of the internal combustion engines power.

The main direction to achieve the above listed indicators is the introduction of electronic control systems, which now acquire the functions of self-study and diagnosis. However, despite all the positive qualities of electronic control systems, the developers propose using for the diagnosis of engines devices intended only for their product, often the cost of such systems is quite high. For this reason, the development of universal diagnostic complexes is topical. It is necessary to take into account the features of transport and technological machine fleet of our country, where simultaneously engines of different generations can be used, among which are mass-produced diesel engines with mechanical fuel management systems and gradually put into operation engines with electronic fuel management systems and work processes.

The most informative indicators testifying the technical state of ICE are the torque and power values, since these indicators are complex. However, torque measurement is a complex task, which requires expensive equipment for the solution, and for some types of equipment it is impossible to measure the developed torque at all. Along with the torque, the complex parameter is the angular acceleration of the crankshaft, which can be

measured on the free shank of the engine crankshaft under various operating conditions, including idling at the minimum speed.

Key words: *diagnosis; internal combustion engine; angular acceleration; crankshaft.*

Манаков Алексей Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатации машин» СГУПС. E-mail: public@stu.ru

Алехин Алексей Сергеевич – преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатации машин» СГУПС. E-mail: twoas@ngs.ru