

ЦИФРОВОЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДВС ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ И ЕГО МОДЕРНИЗАЦИЯ

Егоров Вячеслав Владимирович, к. т. н., ассистент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка и высокие технологии в растениеводстве» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, egorov-empt@rgau-msha.ru

Аннотация: ранее автором разработан аппаратно-программный комплекс «ИМДЦ-2» для диагностики ДВС по показателям их динамики; в настоящей статье описан принцип его работы и процесс активной модернизации комплекса с целью получения более точных и наглядных результатов, а также повышения удобства использования.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, техническая диагностика, динамика двигателя.

Постановка и анализ проблематики. Методы технической диагностики, в том числе применимо к ДВС сельскохозяйственного и транспортного назначения, могут быть классифицированы по трёхуровневой системе в зависимости от трудоёмкости и требуемого инструментария: 1) органолептические; 2) индикаторные; 3) углублённые.

Органолептические методы основаны на органах восприятия человека и не требуют специальных инструментов. Индикаторные методы базируются на комплексном изучении работы двигателя при помощи накладных датчиков. Углублённые методы требуют частичной разборки двигателя, по этой причине их применение ограничено.

Одним из типовых индикаторных методов является диагностирование двигателя по его динамическим характеристикам. В рамках данного подхода можно выделить два подтипа: диагностика при условно стабильной частоте вращения вала и диагностика на переходных режимах.

В первом случае исследуются неравномерности частоты вращения коленчатого вала, как, например, в работах [3, 6]. Диагностика на переходных режимах производится при свободном разгоне и свободном выбеге двигателя.

Динамические методы диагностики также применимы и для дизелей большей мощности; например, авторами работы [4] показан комплексный подход к диагностике судовых дизелей по ускорению свободного разгона, расходу воздуха и параметрам крутильных колебаний.

Метод диагностики ДВС по ускорению свободного разгона. Основным показателем, характеризующим работу двигателя внутреннего сгорания, является его мощность. При поступательном движении мощность: $N = F \cdot v$, при вращательном мощность равна произведению момента силы на угловую скорость: $N = M \cdot \omega$. Определение частоты вращения вала двигателя является несложной задачей, но измерение момента вызывает затруднения, поскольку

требует специализированного оборудования, достаточно трудоёмкого в подключении (либо, в качестве альтернативы, использования динамометрических стендов, рассмотренных в работе [7]). По данной причине ещё в 1970-е годы учёными ГОСНИТИ и ряда других институтов был предложен метод измерения мощности ДВС по характеристикам его ускорения.

Известно, что при вращательном движении момент силы определяется как произведение момента инерции на угловое ускорение, соответственно $M = J \cdot \varepsilon$, аналогично $F = m \cdot a$ при поступательном движении.

Таким образом, задавшись моментом инерции J , угловыми скоростью ω ускорением ε , можно определить мощность двигателя при его разгоне без нагрузки и с максимальной подачей топлива, когда двигатель полностью нагружается собственными моментами сил сопротивления и инерции. Теоретический подход к получению характеристик разгона показан в работе [2].

Значение момента инерции индивидуально для каждой модели двигателя; момент сопротивления варьируется в зависимости от ряда факторов, таких, как вязкость масла, нагрузка на генератор и т. д. Составляющие момента сопротивления рассмотрены в работе [5]. Для диагностирования используют усреднённые значения т. н. приведённого момента инерции, определяемого на прогревом заведомо исправном двигателе и включающего в себя компоненты: от момента инерции и от сил сопротивления. Также на ускорение разгона двигателя влияют конструктивные особенности его системы питания, как отмечено в статье [1].

Как правило, для определения мощности пользуются не способом последовательных вычислений по приведённым выше формулам, а номограммами в осях $\varepsilon - N$, построенными для каждой модели двигателя и рассчитанными для определённой частоты вращения коленчатого вала.

Одним из приборов, использующих данный подход, стал ИМД-Ц разработки 1980-х годов, по современной классификации являющийся аналоговым компьютером. При всех достоинствах прибора он имеет два недостатка: необходимость сверления картера маховика для установки датчика, а также затруднённую настройку, которая связана с чрезмерной чувствительностью ручек подстройки и снижает точность конечного результата.

Развитие цифровых технологий и появление недорогих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) позволяет вывести подобный подход к диагностике на новый уровень, поэтому автором в 2019 году разработан и испытан аппаратно-программный комплекс ИМДЦ-2, имеющий полностью цифровую основу.

В основе работы комплекса лежит измерение промежутков времени между соседними метками диска, установленного на шкиве коленчатого вала. В качестве меток и чувствительного элемента могут быть применены физические зубцы и пара светодиод-фоторезистор, магниты и датчик Холла, а также любой другой способ фиксации прохождения метки возле датчика.

На опытном образце применён диск с единственным магнитом в качестве метки, что не потребовало высокоточного оборудования для разметки диска. Точность при этом оказалась сопоставимой с ИМД-Ц, применённым в качестве эталонного (разница показаний составила порядка 2%), а удобство работы значительно возросло.

Алгоритм работы комплекса. ИМДЦ-2 состоит из аналого-цифрового преобразователя с присоединённым датчиком, подключаемого к компьютеру под управлением ОС Windows, для которой написана программа-интерпретатор с графическим интерфейсом. В программе использован язык Delphi, обладавший в своё время высоким потенциалом для прототипирования, но на текущий момент устаревший. Также для разработки на Delphi используются проприетарные программы, что может вызвать затруднения с лицензированием.

Поступающие от АЦП последовательные значения промежутков времени в микросекундах $\mu_0, \mu_1, \mu_2 \dots$ обрабатываются программой по следующему алгоритму линейной фильтрации:

$$\mu_2 < k_\phi \cdot \mu_1 \Rightarrow \mu_2 = 2\mu_1 - \mu_0, \quad 1)$$

где k_ϕ — коэффициент фильтрации, устанавливаемый по результатам тестовых измерений так, чтобы исключить ложные срабатывания фильтра.

Далее для каждого μ_i определяется частота вращения коленчатого вала, об/мин:

$$n = \frac{60 \cdot 10^6}{N_m \cdot \mu}, \quad 2)$$

где N_m — количество меток (делений) отметчика на один оборот вала двигателя.

Угловое ускорение коленчатого вала определяется по следующей формуле, рад/с²:

$$\varepsilon = 2\pi \cdot 10^6 \cdot \frac{10^6/\mu_2 - 10^6/\mu_1}{\mu_2 \cdot N_m}. \quad 3)$$

Применение двойного преобразования с 10^6 вызвано особенностями компьютерных вычислений для десятичных дробей и позволяет несколько повысить точность результата.

Поскольку необходимо получить значение ε для конкретного значения частоты вращения вала (при $n = n_p$ — частота начала действия регулятора), применяется линейная интерполяция, отправной точкой для которой служит одновременное выполнение условий: $n_{i+1} > n_i$; $n_i < n_p$; $n_{i+1} > n_p$.

После пятикратного замера ускорения определяется среднее ускорение разгона $\bar{\varepsilon}$, которое далее преобразуется в значение эффективной мощности, кВт, по следующей формуле:

$$N_e = a + b\bar{\varepsilon} + c\bar{\varepsilon}^2, \quad 4)$$

где a, b, c — индивидуальные коэффициенты для заданного типа двигателя.

Получаемые значения отображаются интерфейсом программы. Нажатие кнопки «Запись» позволяет дополнительно сохранять в файл получаемые значения для дальнейшего анализа и графического представления, например, при помощи пакета *pgfplots* системы компьютерной вёрстки TeX, как представлено на рис.

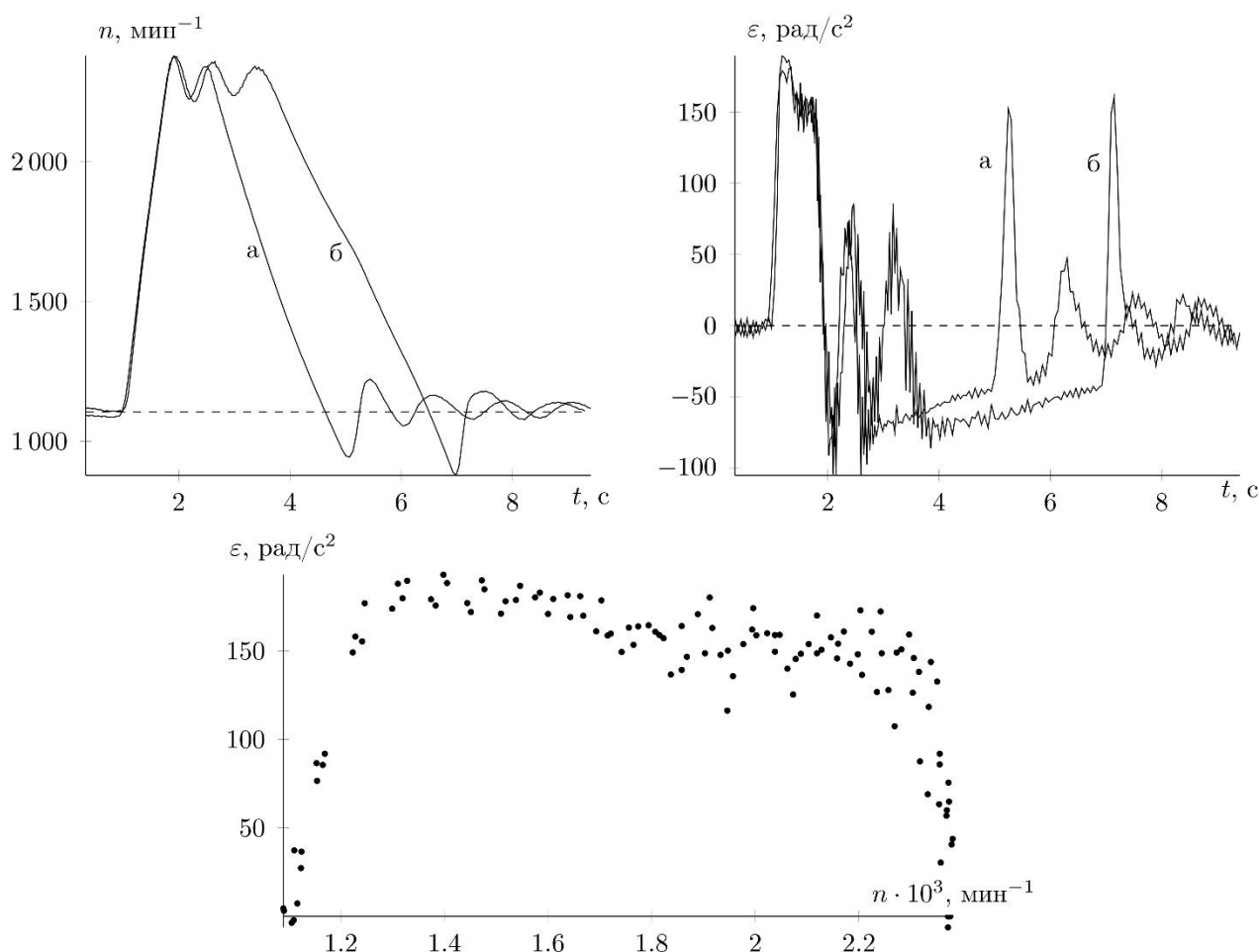


Рис. Характеристики разгона двигателя Д-240

Ход модернизации комплекса ИМДЦ-2. Модернизация в данном случае представляет собой создание нового программного обеспечения и переход к более компактной аппаратной основе. На текущий момент получены следующие результаты:

1. Замена текстовой передачи данных от АЦП компьютеру на численную (единая длина числа в 4 байта) позволила повысить частоту чтения данных до 7 кГц. Благодаря этому возможно использование отметчиков с увеличенным числом делений (к примеру, для дизеля Д-240 подобная частота дискретизации гарантированно даёт возможность использования дисков со 100 метками на один оборот).

2. Использование языка Python с графической оболочкой Tk даёт возможность отказаться от проприетарного программного обеспечения, а также

расширяет графические возможности программы, в том числе позволяя в режиме реального времени отображать характеристики разгона двигателя в различных осях. Также работа связки Python+Tk гарантируется в большинстве операционных систем, в том числе, распространяемых на свободной (бесплатной) основе.

3. При использовании специального программного модуля возможна прямая передача диагностических показателей двигателя в авторскую экспертную систему технической диагностики Exsys, позволяющую по совокупности признаков объекта выявлять его неисправности.

Заключение. Модернизация комплекса ИМДЦ-2 позволит повысить точность его работы и эргономику процесса диагностирования, что в совокупности даёт эффект по снижению трудоёмкости динамической диагностики и возможность её применения на низших видах ТО и в полевых условиях.

Библиографический список

1. Вертей, М. Л. Обоснование способа разгона двигателя принудительным впрыском топлива и электрическим управлением топливоподачей при проведении тестового диагностирования / М. Л. Вертей // Вестник АГАУ. – 2015. – № 2 (124). – с. 112–116.

2. Джалолов, У. Х. Идентификация параметров разгонной характеристики двигателя внутреннего сгорания / У. Х. Джалолов [и др.] // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 35. – с. 43–56.

3. Корнеев, А. Е. Устройство для исследования неравномерности вращения коленчатого вала / А. Е. Корнеев // ОНВ. – 2020. – № 5 (173). – с. 40–43.

4. Лебедев, Б. О. Оценка мощности судовых энергетических установок / Б. О. Лебедев, В. И. Кочергин, С. С. Глушков // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2019. – № 2. – с. 56–63.

5. Нестеренко, Г. А. Обзор различных методов исследования потерь на трение в двигателях внутреннего сгорания / Г. А. Нестеренко [и др.] // МНИЖ. – 2022. – № 1-1 (115) – с. 52–54.

6. Плаксина, Е. Т. Применение прецизионных хронометрических технологий для мониторинга отклонений в работе двигателей внутреннего сгорания / Е. Т. Плаксина; А. Б. Сырицкий; А. С. Комшин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 11 (119).

7. Савенков, Н. В. Анализ характеристик современного оборудования для определения тягово-скоростных свойств автомобилей в лабораторных условиях // Н. В. Савенков; . В. Понякин; С. А. Чекулаев; В. В. Бутенко // Вестник СибАДИ. – 2019. – № 3 (67). – с. 276–289.