

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

Темой статьи является выбор направления и реализация применения электронных средств измерений и контроля за рабочим процессом, происходящим в дизельном двигателе внутреннего сгорания. С этой целью проведен анализ и разработано устройство, позволяющее контролировать неравномерность вращения коленчатого вала двигателя, содержащее фотоэлектронные датчики, один из которых позволяет считывать момент прохождения верхней мертвой точки, другой предназначен для контроля за угловой скоростью маховика. Устройство преобразует сигналы этих датчиков в форму, необходимую для визуализации рабочего периодического процесса на экране осциллографа. В статье приведены структурная схема устройства и его амплитудно-частотная характеристика. Данное устройство может быть использовано для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по совершенствованию систем подачи топлива в поршневых двигателях внутреннего сгорания.

Ключевые слова: топливовоздушная смесь, эффективность сгорания топлива, неравномерность вращения коленчатого вала, инфракрасные фотоэлектронные датчики, электронный частотомер.

Введение. Существует ряд направлений совершенствования поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), устанавливаемых в военных гусеничных и колесных машинах (ВГ и КМ). Одним из них является увеличение коэффициента удельного эффективного сгорания топлива, который во многом предопределяет мощностные показатели, экологичность и экономичность современных ДВС. В этом русле проводятся многие перспективные научные исследования как в стране, так и за рубежом.

Сложность физико-химических процессов, происходящих в тепловой машине, затрудняет построение количественной или даже качественной модели для термодинамических расчетов, что необходимо для оптимизации алгоритма подачи топлива. Это, прежде всего, связано с недостаточной ясностью физических явлений теплопередачи и преобразования энергии, газовой динамики впускных и выпускных элементов двигателя, невозможностью их полного формального описания. Поэтому не теряют актуальность эмпирические исследования с оценкой эффективности, а вместе с ними требуется соответствующая измерительная и регистрирующая аппаратура. При этом наибольший интерес представляют приведенные в Государственном стандарте [1] быстроходные двигатели I группы.

Постановка задачи. В настоящее время тепловые процессы в ДВС исследуют преимущественно путем расчета выходных данных по значениям параметров и показателей, оценивающих состояние рабочего тела, например, таких как температура, давление, объем и связанных с ним: потребление

топлива и воздуха, частота вращения коленчатого вала [2]. Но с появлением и развитием теории систем на первое место выдвигаются не столько усредненные значения состояния, сколько регистрируемый рабочий процесс. Такой (системный) подход предполагает регистрацию тех же параметров, но в результате непрерывных (процессных) измерений [3], например, для последующего сравнения текущих данных с идеализированными циклами.

В [4] показано, как системный подход с помощью специально созданной теории динамических информационных систем позволяет сопрягать результаты процессных исследований с построением многомерных фазовых поверхностей, отображающих функционирование исследуемой технической системы. Сверхзадачей такого подхода является построение замкнутых многомерных фазовых поверхностей, на основании чего может быть решена задача оптимизации алгоритма подачи топлива. А для этого требуются иные конструкции встраиваемых первичных измерительных преобразователей (датчиков) и алгоритмы обработки полученной информации. Практическая реализация подобного подхода для совершенствования систем подачи топлива частично осуществлена в универсальном электронном регуляторе частоты вращения коленчатого вала дизеля [5].

Определение системных показателей работы поршневых ДВС в режиме реального времени зачастую основывается на расчетном (косвенном) определении мощности каждого из цилиндров многопоршневых ДВС, крутящего момента без встраивания внутрь специальных измерительных преоб-

разователей (в первую очередь, датчиков давления). С использованием выходных данных определяют силовое взаимодействие всех частей, энергию перехода в работу, и в этом случае не нарушается оригинальная конструкция внутренних узлов. Одно из таких технических решений реализовано в устройстве, описанном в патенте США [6]. Недостатком данного устройства является невозможность контроля за работой внутренних узлов ДВС, без вмешательства в исследуемую техническую систему, с сохранением ее конструкции.

Системный подход с рассмотрением двигателя внутреннего сгорания как технической системы стал еще более значимым после появления новых систем подачи топлива типа «Общая магистраль» (в зарубежной транскрипции «Common Rail»). В этих системах значение имеет не только точное определение текущей потребности в объеме топливовоздушной смеси (ТВС), но и моменты, а также количество многократного (в течение каждого рабочего цикла) впрыска [7].

Таким образом, многие существующие автоматизированные системы испытаний ДВС, действующие на основе усредняемых показателей, теряют своё значение.

Современные технические решения для определения неравномерности вращения коленчатого вала. Выбор средств измерений неэлектрических величин при испытаниях силовых установок ВГ и КМ напрямую зависит от задачи исследования. В связи с вышесказанным, представляет теоретический и практический интерес создание универсального измерительного комплекса, позволяющего проводить широкий спектр непрерывных измерений параметров и построения характеристик ДВС при определенных положениях и угловой скорости коленчатого вала.

Важным параметром поршневого ДВС является частота вращения коленчатого вала, которая в сочетании с крутящим моментом определяет цилиндровый [8] вклад в суммарную мощность двигателя. В современных автомобилях этот параметр (частота вращения коленчатого вала) определяет бортовой компьютер (контроллер), как правило, с некоторой дискретностью. При этом достаточным считается достижение относительной погрешности порядка двух процентов.

В автомобилях с бензиновыми ДВС контроллер определяет и другой важный показатель — неравномерность вращения коленчатого вала, в об/сек², то есть первую производную скорости вращения по времени. Обычно это происходит путём расчета времени полуоборота коленвала и, используя полученные данные, определяют приращение скорости вращения вала за каждый полуоборот. Контроль угловой скорости вращения здесь необходим для определения пропусков зажигания в отдельных цилиндрах.

Данная задача частично решена в устройстве [9], который позволяет определять параметр вращения в пределах фиксированного углового поворота коленчатого вала и сравнивать его с временем поворота вала на последующем угловом интервале. Однако известное устройство сложно реализуемо, поскольку для достижения удовлетворительной точности требуется сложная цифровая обработка данных с высокой несущей частотой, на которой способны работать немногие детали современной элементной базы. Кроме того, выходной сигнал в форме удобной для визуализации требует дополнительно-

го преобразования в аналоговый вид, что также усложняет реализацию устройства.

Усовершенствовав конструкцию датчиков и алгоритм обработки данных, можно получить непрерывную зависимость значения угловой скорости вращения коленчатого вала в течение каждого рабочего цикла с некоторой приемлемой дискретизацией. Такие измерения позволяют отслеживать как процессы сгорания в одноцилиндровых двигателях, так и неравномерность работы отдельных рабочих камер в многоцилиндровых ДВС.

Несмотря на наличие во многих конструкциях маховика, обладающего моментом инерции (не изменяющимся в каждом конкретном ДВС в режиме холостого хода), существует неравномерность вращения, обусловленная фазами вспышки, воспламенения и т.д. в рабочем цикле. В многоцилиндровых ДВС вклад энергии сгорания ТВС каждого из цилиндров в общую мощность пропорционален угловой скорости вращения коленчатого вала (КВ) во вполне определенном угловом положении двоянного оборота.

Известно, что сила, направленная на вращение коленчатого вала, в конечном итоге представляет собой некую периодическую функцию. Неравномерность изменения крутящего момента более всего определяется особенностями протекания рабочего процесса сгорания ТВС и кинематическими свойствами кривошипно-шатунного механизма. Между изменением крутящего момента и угловой скоростью вращения коленчатого вала в установившемся режиме работы двигателя существует вполне определённая связь. В таком случае, сравнивая изменения угловой скорости в соответствующих работе отдельных цилиндров диапазонах угла поворота КВ, можно составить распределение значений создаваемых крутящих моментов и характер работы отдельных цилиндров. В одноцилиндровых ДВС такая оценка будет непосредственно отображать процессы сгорания, что необходимо для определения оптимального количества и требуемых моментов подачи топливовоздушной смеси, что может оказаться востребованным в системах с электронным управлением.

Наиболее просто данная задача может решаться в лабораторных экспериментах, где нагрузкой на двигатель является электрический генератор. В такой установке можно непрерывно контролировать текущие значения тока, протекающего через электрическую нагрузку, которые путем синхронизации с фазами рабочего процесса вполне однозначно связаны с рабочими процессами в цилиндре(-ах). Однако такое обстоятельство может быть редко применимо на практике и особенно в режимах эксплуатации.

Устройство для определения неравномерности вращения коленчатого вала. На рис. 1 представлена структурная схема более универсального технического решения. Данное устройство позволяет проводить непрерывные измерения угловой скорости вращения маховика ДВС без вмешательства в конструкцию силовых агрегатов. Это реализуется путем применения двух оптических датчиков, работающих в инфракрасном диапазоне длин волн. Так, в работе [10] указывается, что, в сравнении с пьезоэлектрическими, емкостными, тензометрическими и индуктивными, оптические датчики не инерционны, а значит, обеспечивают сигнал, не зависящий от угловой скорости перемещения индицируемого устройства.

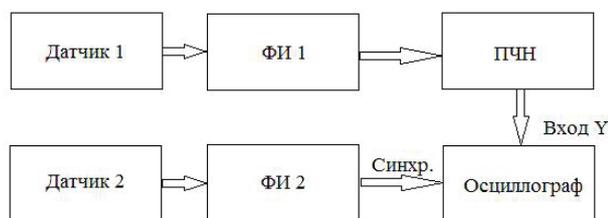


Рис. 1. Структурная схема устройства для исследования неравномерности вращения коленчатого вала

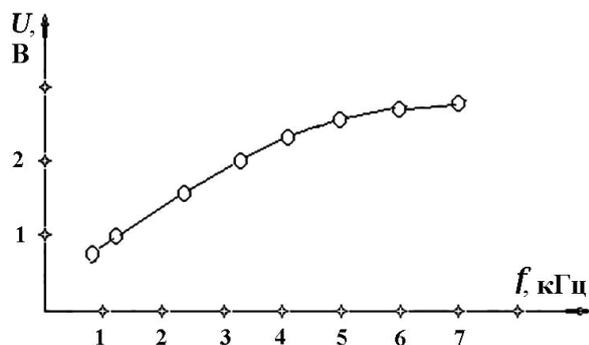


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика устройства для исследования неравномерности вращения коленчатого вала

При этом первый датчик обеспечивает определение некоего одного характерного положения маховика в течение цикла, например, в верхней мертвой точке (ВМТ), другой может быть применен для детального контроля скорости углового перемещения всех зубьев маховика.

На ряде многоцилиндровых двигателей маховик отсутствует, что упрощает идентификацию процесса сгорания топлива, но несколько усложняет получение информации о точном положении коленвала и его угловой скорости вращения. В таком случае на вал устанавливается дополнительный диск со шкалой в виде равномерно расположенных отверстий. Другим вариантом является применение системы оптического считывания отраженного луча монохромного лазера от шкалы градусов поворота, установленной на валу многих двигателей, применяемых в военной автобронетанковой технике.

Принципиальным является применение оптических датчиков, поскольку сигнал этого вида первичных преобразователей, в отличие от наиболее распространенных индуктивных, по форме и амплитуде не зависит от скорости перемещения зубьев, что не влияет на точность определения угловой скорости вращения коленвала. Сигнал в инфракрасном (или красном) диапазоне обеспечивает требуемую помехоустойчивость устройства.

Датчики 1 и 2 представляют собой свето-фотодиодные пары, первый из которых устанавливается в «просвет» зубьев маховика коленвала. При его скорости вращения, равной 2000 об/мин, частота импульсного сигнала с датчика 1 составляет порядка 5 кГц. Световой поток датчика 2 устанавливается в «просвет» специально выполненного дополнительного отверстия в маховике, момент прохождения которого совпадает с положением ВМТ первого поршня.

Сигналы обоих датчиков поступают на входы соответствующих формирователей импульсов ФИ1 и ФИ2, одновибраторов с длительностью импульсов порядка 0,1 миллисекунды. С выхода первого формирователя последовательность импульсов поступает на вход ПЧН — преобразователя «частота — напряжение», представляющего собой электронный частотомер, выполненный на базе прецизионного конвертора LM331. На выходе частотомера действует аналоговый сигнал, напряжение которого пропорционально частоте входных импульсов.

Развёртка осциллографа запускается импульсами с формирователя импульсов ФИ2 в момент прохождения ВМТ двигателя и, в зависимости от длительности прохождения луча по оси X, может быть настроена на период, близкий длительности рабочего цикла испытуемого ДВС. Таким образом, на экране осциллографа периодически регистрируется форма и амплитуда периодических изменений угловой скорости вращения. Экспериментально получена амплитудно-частотная характеристика устройства, которая представлена на рис. 2.

Дискретность измерения угловой частоты вращения маховика определена количеством зубьев. Взамен использования зубьев маховика на рабочий вал дополнительно могут быть установлены диски с необходимым количеством отверстий. Чувствительность в определении неравномерности вращения может быть существенно увеличена путём увеличения напряжения питания конвертора (с 5 до 15 Вольт), либо за счёт усиления выходного напряжения преобразователя «частота — напряжение» усилителем переменного тока.

В случае применения лазерного считывания частота импульсов составляет диапазон частот порядка 12 кГц. Чтобы преобразователь «частота — напряжение» работал эффективно на этой частоте необходимо либо применение делителя импульсов, либо перенастройка преобразователя на более высокий диапазон частот.

Второй вариант более предпочтителен, поскольку позволяет повысить чувствительность всего устройства.

Таким образом, на экране осциллографа (по оси Y) можно наблюдать неравномерность соучастия каждого из цилиндров за весь цикл работы исследуемого поршневого двигателя внутреннего сгорания. Например, при номинальной скорости вращения коленчатого вала, составляющей 2400 оборотов в минуту, время хода луча электронного осциллографа по оси X составит 25 миллисекунд. Следовательно, для наблюдения всего рабочего цикла требуется развёртка длительностью периода в 50 миллисекунд.

Анализ полученных результатов. Применение устройства, структурная схема которого представлена на рис. 1, позволяет относительно просто регистрировать внутренние процессы сгорания топлива в поршневом двигателе внутреннего сгорания. Не вызывает сомнения и универсальность данного метода контроля, поскольку устройство может быть применено в большинстве типов двигателей без вмешательства в их конструкцию.

Однако для получения наиболее полной информации об эффективности тепловых процессов во всех цилиндрах необходимо построение характеристик в системе координат $p = f(V)$, для чего, как минимум, требуется встраивание датчиков давления вовнутрь каждого из цилиндров, что на практике далеко не всегда оправданно.

Заключение. Процессный контроль параметров работы ДВС с применением электронных компонентов может стать перспективным в военной автотанковой технике. С точки зрения надёжности эксплуатации, по-видимому, должны быть применены гибридные системы, в которых электронный контроль является дополняющим, а не полностью заменяющим традиционные схемы управления подачей ТВС.

Разработанное устройство является универсальным для любого вида поршневых двигателей внутреннего сгорания. Оно позволит контролировать процесс сгорания топлива в ДВС с минимальными затратами материальных ресурсов в непрерывном режиме работы, не вмешиваясь в конструкцию рабочих узлов силовой установки.

Более глубокие исследования можно проводить, если про дифференцировать кривую зависимости скорости вращения коленчатого вала от фазы периода. То есть с применением разработанного устройства может быть также решена и задача: по неравномерности индикаторного крутящего момента (в об/с^2) при некоторых определенных показателях кинематических свойств КШМ можно реконструировать процесс сгорания с возможной коррекцией параметров подачи топливовоздушной смеси и, соответственно, режима работы ДВС.

Расширение возможностей численного эксперимента, создание адаптивных алгоритмов исследования с применением обычных средств регистрации и компьютерной системы обработки данных позволит уточнить многие детали рабочего процесса сгорания ТВС, оптимизировать его, создать предпосылки для разработки автоматически регулируемых алгоритмов управления процессом подачи топливовоздушной смеси.

Автором сделан вклад в развитие обозначенной темы с перспективой ее сопряжения с изучением рабочих циклических процессов в поршневых ДВС и с совершенствованием систем подачи топливовоздушной смеси.

Библиографический список

1. ГОСТ 10448-2014. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приёмка, методы испытаний. Введ. 2016–01–01. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
2. Нефедов В. И., Денисенко Д. В. [и др.] Основы научных исследований и испытания транспортных средств специального назначения / МО РФ. Омск: Изд-во ОАБИИ, 2015. 399 с.

3. Сизиков В. П., Разумов В. И. Понимание процесса как системы в развитии вычислительной математики // Современные тенденции развития науки и технологий: сб. науч. тр. по материалам XI Междунар. науч.-практ. конф. 29 февраля 2016 г. / под общ. ред. Е. П. Ткачевой. Белгород: ИП Ткачёва Е. П., 2016. № 2-1. С. 14–24. ISSN 2413-0869.

4. Разумов В. И., Сизиков В. П. Прогнозирование процессов в обществе с учетом фактора ноосферы // Вестник Омского университета. 2018. Т. 23, № 3. С. 159–169. DOI: 10.25513/1812-3996.2018.23(3).159-169.

5. Прохоренко А. А., Кравченко С. С., Карягин И. Н. [и др.]. Разработка универсального электронного регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля // Двигатели внутреннего сгорания. 2017. № 2. С. 35–39. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.2.07.

6. Пат. 2082139 Российская Федерация, МПК G 01 MO 15/00. Способ диагностики поршневого двигателя внутреннего сгорания и устройство для его осуществления / Кегелер Х.-М., Кунфельд В. № 4894028/06; заявл. 21.12.90; опубл. 20.06.97.

7. Мокроусов Д. С. Руководство по эксплуатации 5340.3902150 РЭ. Ярославль: ОАО Автодизель (ЯМЗ), 2016. 160 с.

8. Пахомов Ю. А. Основы научных исследований и испытаний тепловых двигателей. М.: Транслит, 2009. 432 с. ISBN 978-5-94976-706-1.

9. Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология. М.: Логос, 2000. 404 с. ISBN 5-94010-039-2.

10. Верецагин С. Б. Планирование и оценка результатов испытаний колесных и гусеничных машин. М.: МАДИ, 2008. 60 с.

КОРНЕЕВ Алексей Емельянович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Двигатели».

SPIN-код: 6014-6420

AuthorID (РИНЦ): 1067282

Адрес для переписки: a.korneev.om@gmail.com

Для цитирования

Корнеев А. Е. Устройство для исследования неравномерности вращения коленчатого вала // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 40–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-40-43.

Статья поступила в редакцию 14.09.2020 г.

© А. Е. Корнеев