

## РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ ПОРШНЯ ДВС

### Введение

Современные тенденции в поршневом двигателестроении направлены на повышение скоростей вращения коленчатого вала, увеличение ресурса работы и улучшение топливной экономичности двигателей. Это придает все большую актуальность вопросам оптимизации при проектировании деталей цилиндра-поршневой группы (ЦПГ), так как эффективные и ресурсные показатели двигателя в значительной степени определяются совершенством именно узлов трения. Важной задачей, в частности, является создание энергосберегающего сопряжения поршень-цилиндр, обладающего минимальными механическими потерями и работающего, преимущественно, в условиях жидкостного трения.

Особое внимание при проектировании таких сопряжений уделяется исследованиям влияния геометрических и массово-инерционных характеристик поршня на динамическую нагруженность и эффективность работы пары в целом. В настоящее время существуют методики и программы, позволяющие с достаточной точностью описывать динамику поршня с учетом его геометрии, напряженно-деформированного состояния (НДС) и гидродинамических эффектов, возникающих в зазорах пары [1,2]. Однако, важными моментами при использовании всех этих методов является корректность описания процесса движения поршня при изменении режима трения в паре, а также необходимость учета всех составляющих сил инерции, что не всегда возможно ввиду принимаемых допущений. Следовательно, для эффективного применения при проектировании деталей ЦПГ расчетных методов, необходима их верификация и уточнение на основании результатов экспериментальных исследований.

### Формулирование проблемы

Проблема экспериментального исследования динамики поршня обусловлена тем, что он совершает сложное плоско-параллельное движение, которое характеризуется практически мгновенным изменением динамических и кинематических параметров, и отличается существенной их неравномерностью в пределах цикла. Одновременно с

этим, это движение происходит в пределах «замкнутого» пространства цилиндра, что накладывает ограничение на возможность проведения прямых измерений параметров такого движения. Поэтому, для практического исследования таких процессов возникает необходимость создания и применения интегрированной измерительной системы малых перемещений (ИСМП) поршня, удовлетворяющей, помимо требований точности, также ряду специфических требований, продиктованных особенностями работы ДВС. Так измерительная аппаратура, работающая в условиях горячих быстро движущихся частей двигателя, должна отличаться малой инерционностью и быть устойчивой к агрессивной внешней среде. Кроме того, влияние измерительной системы на исследуемые процессы и геометрические характеристики сопряжения должно быть минимальным.

Целью настоящей работы является разработка бесконтактной высокоскоростной измерительной системы малых перемещений, предназначенной для опытного исследования динамики пары «поршень – цилиндр» в процессе работы двигателя.

Для достижения цели, поставленной в данной работе, решаются следующие задачи:

- построение структурной схемы ИСМП;
- выбор современной элементной базы и разработка конструкции датчиков;
- разработка электрической схемы блока усилителя (БУ);
- разработка программного обеспечения (ПО) управления ИСМП;
- определение характеристик разработанной аппаратуры (тарировка, апробация).

### Структурная схема ИСМП

Разработанная ИСМП состоит из трех независимых измерительных комплексов (ИК):

- основной – измерение малых перемещений поршня (ИКМП);
- вспомогательный – термокомпенсационный (ИКТк);
- комплекс измерения температуры масляного слоя в зазоре между поршнем и цилиндром (ИКТМ).

Обобщенная структурная схема ИСМП, ориентированная на опытное исследование динамики поршня ДВС в процессе работы, представлена на рис. 1:

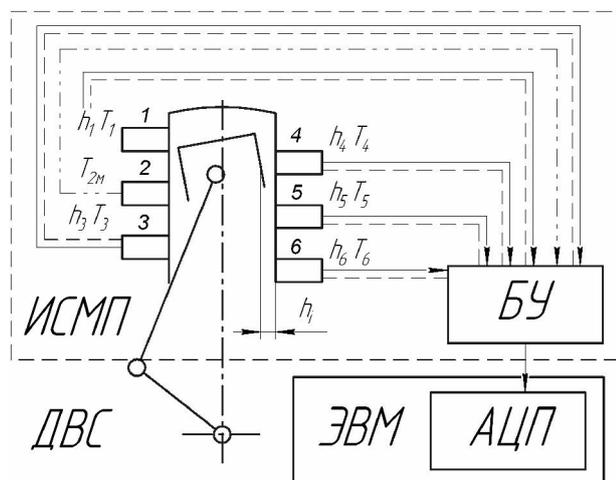


Рис. 1. Структурная схема ИСМП: 1,3...6 – датчики основного ИКМП (ИКТк); 2 – датчик ИКТМ; БУ – многоканальный аналоговый блок усилитель; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЭВМ – электронно-вычислительная машина

### Выбор элементной базы и принципы работы ИСМП

Для получения достаточной точности измерений малых перемещений поршня, обеспечения необходимого уровня быстродействия и удовлетворения повышенным требованиям с точки зрения надежности, в качестве датчика ИКМП был выбран резонансный вихретоковый датчик, выполненный автором по оригинальной конструкции. Чувствительным элементом (ЧЭ) такого датчика является катушка индуктивности  $L_1$ , набранная на С-образном магнитопроводном сердечнике. В совокупности катушка  $L_1$  с конденсатором  $C_1$  составляют параллельный колебательный контур, возбуждаемый R-С генератором, состоящим из двух элементов микросхемы 564ЛН2[3].

Принцип работы ИКМП основан на явлении электромагнитной индукции. Максимальная чувствительность датчика достигается при наибольшей амплитуде колебаний, и устанавливается на резонансном режиме работы контура. При сближении ЧЭ с электропроводным объектом исследования в объекте наводятся вихревые токи, которые воздействуют на поле самой возбуждающей катушки, изменяя ее индуктивность. Такое изменение приводит к нарушению резонанса и уменьшению амплитуды переменного напряжения в L-С контуре

пропорционально расстоянию до объекта исследования[3,4].

Усиление и преобразование аналогового сигнала в колебательном контуре осуществляется в многоканальном блоке усилителя. Поскольку внутреннее сопротивление L-С контура значительное, то в качестве усиливающего элемента применен полевой транзистор, имеющий большое входное сопротивление. После усиления сигнал детектируется диодом  $VD_2$  и сглаживается  $R_4$ - $C_3$  фильтром[5,6]. Таким образом, на выходе блока возникает аналоговый сигнал постоянного напряжения, регистрируемый ЭВМ. Электрическая схема блока усилителя реализована в виде печатной платы, которая предусматривает подключение до 8 независимых каналов. Принципиальная схема вихретокового датчика и блока усилителя приведена на рис. 2.

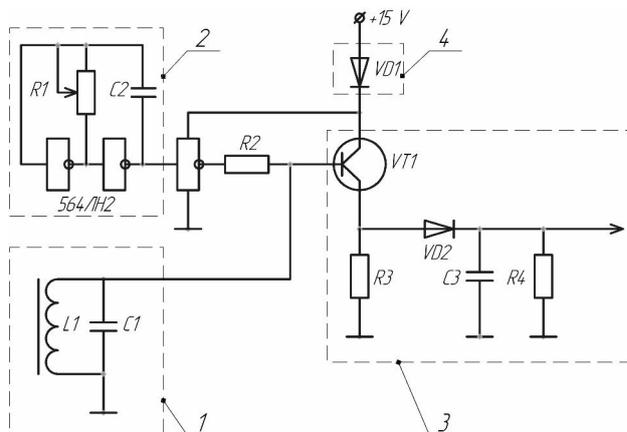


Рис. 2. Принципиальная схема ИКМП: 1 – резонансный L-С контур (ЧЭ); 2 – генератор несущей частоты; 3 – усилитель, амплитудный детектор, фильтр; 4 – защита от неправильной полярности

Термокомпенсация ИКМП осуществляется численно, корректировкой характеристик вихретоковых датчиков с учетом температур катушек индуктивности. Датчиком температуры для ИКТк выбран стандартный датчик DS18B20 с цифровым выходом, который обеспечивает точность измерений  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , время отклика составляет 750 мсек, поддерживает однопроводной интерфейс MicroLAN и выполнен в стандартизированном миниатюрном корпусе TO-92. Каждый ЧЭ DS18B20 размещается в непосредственной близости катушек индуктивности вихретоковых датчиков (на расстоянии не более 1 мм). Выходные цифровые сигналы ИКТк индицируются на ЖК-дисплее БУ в градусах Цельсия. Регистрация сигналов проводит-

ся последовательно для каждого канала визуально-оптическим методом.

Измерение температуры масла на поверхности цилиндра осуществляется ИКТМ в «условно конечном» объеме, сформированном путем оригинального профилирования торца корпуса температурного датчика. Чувствительным элементом ИКТМ является термопара ТХА. Холодный спай термопары расположен на печатной плате дифференциального усилителя. Температура холодного спаия измеряется цифровым термометром ТМР37[4].

Чувствительные элементы всех ИК упакованы в малогабаритные корпуса (с характерным диаметром 8 мм). Корпуса выполнены из дюралюминиевого сплава Д16 и предусматривают возможность интеграции в состав двигателя. Неразъемность соединений с корпусами, однозначность ориентирования и термостойкость ЧЭ обеспечивается применением высокотемпературного эпоксидного клея ВК-9. Внешний вид вихретоковых датчиков представлен на рис. 3.

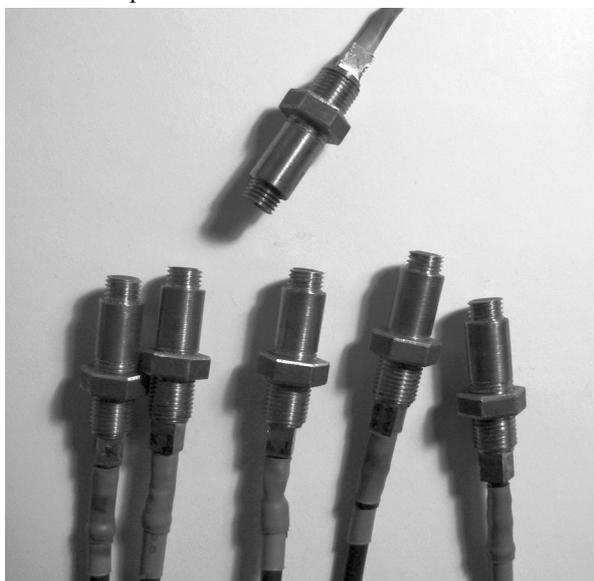


Рис. 3. Внешний вид вихретоковых датчиков

Печатные платы БУ, блок питания и основные органы управления измерительной системой размещены в компактном алюминиевом корпусе. Связь датчиков с блоком усилителем осуществляется по коаксиальным экранированным проводникам; коммутация по стандартным разъемам СГ-5. Внешний вид разработанной ИСМП представлен на рис. 4.

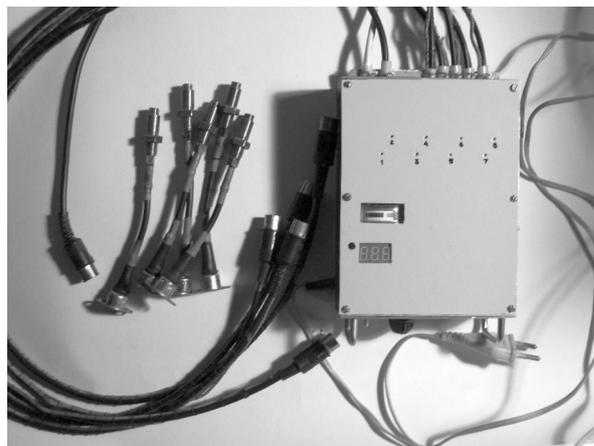


Рис. 4. Внешний вид разработанной ИСМП

### Апробация ИСМП

Апробация и оценка эффективности действующего образца ИСМП предполагали:

- установление характеристик ИКМП;
- установление характеристик ИКТМ;
- оценку точности и инерционности ИКМП.

Характеристики ИКМП получены в процессе тарировки измерительной системы на базе испытательного моторного стенда ПАО «АВТРАМАТ». С целью исключения погрешностей, связанных с переустановкой и базированием датчиков, тарировка проводилась непосредственно на объекте исследования – двигателе ВАЗ 21083 серийной конструкции. Чувствительные элементы ИСМП были предварительно интегрированы в состав двигателя (препарировкой 4-го цилиндра).

Программа проведения тарировочных работ предусматривала определение статических характеристик ИКМП в процессе измерений эталонных зазоров. Эталонные зазоры формировались между специально спрофилированным тарировочным поршнем и цилиндром двигателя.

Применяемый тарировочный поршень выполнен по оригинальной авторской конструкции и представляет собой тело вращения, содержащее девять ступенчатых цилиндрических «поясов» различных диаметров, образующих в сопряжении с цилиндром девять соответствующих зазоров. Для однозначности центрирования и минимизации перекосов поршня, пояса № 1,5,9 выполнены с диаметрами, практически равными номинальному диаметру цилиндра. Точность выполнения поясов контролировались 3-х координатной контрольно-измерительной машиной Wenzel LH54. Внешний вид тарировочного поршня представлен на рис. 5.

Перемещение тарировочного поршня в пределах цилиндра осуществлялось вручную. Статические характеристики получены в процессе индивидуальной тарировки каждого датчика в диапазоне эталонных зазоров (от 0 до 0,24 мм) и температур (от 20 до 130°C). Нагревание ЧЭ осуществлялось электрическим нагревательным элементом. Температура регистрировалась ИКТк. Выходные аналоговые сигналы ИКМП регистрировались и оцифровывались высокоскоростным АЦП РЮ-821, находящимся в составе ЭВМ.

РЮ-821 представляет собой многофункциональный РСІ адаптер с тактовой частотой микропроцессора 1,2 МГц, содержащий 16SE/8D (12-битных) каналов АЦП, один канал ЦАП, 16DI, 16DO. Синхронизация ИСМП с АЦП осуществлялась программным обеспечением авторской разработки.



Рис. 5. Тарировочный поршень

Анализ результатов тарировки ИКМП показал, что реальные характеристики датчиков в интересующих диапазонах зазоров и температур близки к линейным. Линеаризация экспериментальных данных проведена методами регрессионного анализа (коэффициенты корреляции составляют  $R^2=0,964...0,992$ ). Экспериментальная и линеаризованные статические характеристики ИКМП представлены на рис. 6.

Оценка точности ИКМП заключалась в определении абсолютной погрешности измерений. Суммарная погрешность в условиях индивидуальной тарировки датчиков складывается из ряда составляющих:

- погрешности формы тарировочного поршня;
- погрешности формы цилиндра;
- погрешности, вносимой при контрольных измерениях тарировочного поршня и цилиндра;

- погрешности формирования эталонного зазора;
- погрешности, вносимой при линеаризации характеристик ИСМП.

Таким образом, установлено, что ИСМП обеспечивает достаточную точность измерений  $\pm 3...4$  мкм.

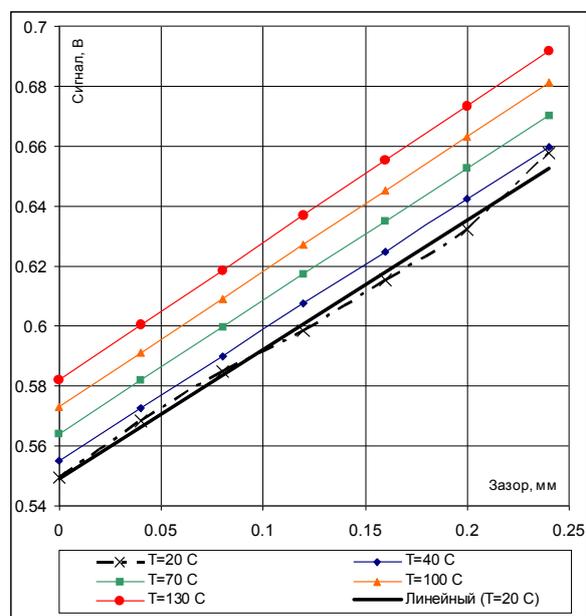


Рис. 6. Характеристики вихрекового датчика

Инерционные характеристики ИКМП полученные в результате апробации измерительной системы при исследовании динамики поршня серийного двигателя ВАЗ 21083. Экспериментально определялось время переходных процессов протекающих в ИКМП – «время запаздывания» при приложении к ЧЭ ступенчатого тарированного входного воздействия. Таким воздействием являлось «вхождение-выхождение» быстро движущегося поршня в электромагнитный контакт с вихрековым датчиком. Анализ результатов исследований показал, что характерные постоянные времени ИКМП составляют  $T_{икмп}=8,1 \cdot 10^{-4}...8,5 \cdot 10^{-4}$  с, при этом минимальное время электромагнитного контакта поршня с датчиком на рабочих режимах составляет  $T_{эл.конт}=3,5 \cdot 10^{-3}...3,8 \cdot 10^{-3}$  с. Следовательно, т.к. время переходных процессов в ИКМП значительно меньше времени, в течении которого поршень находится в электромагнитном контакте с датчиком, то ИКМП удовлетворяет требованиям по быстродействию.

#### Заключение

Разработанная измерительная система позволяет экспериментально получать кинематические

параметры сложного плоско-параллельного движения поршня в процессе работы двигателя – зазоры. Кроме этого, по результатам измерений, представляется возможным выявить вероятные пятна контакта сопряжения и оценить как общую, так и локальную динамическую нагруженность пары.

Приемлемая точность измерений, в сочетании с малой инерционностью системы, позволяют использовать результаты измерений не только для качественного анализа динамики поршня, но и для верификации математических моделей.

Одновременно с этим, возможность гибкой модернизации конструкции корпусов датчиков, постоянство характеристик ИСМП при работе с объектами исследования, обладающими различными магнитными свойствами, значительно расширяют области возможного применения предложенной аппаратуры.

Действующий образец устройства успешно прошел апробацию на моторном стенде ПАО «АВТРАМАТ», при исследованиях динамики поршня 4-го цилиндра серийного двигателя ВАЗ 21083.

Дальнейшее совершенствование измерительной аппаратуры направлено на повышение точности, быстродействия и ресурсных показателей ЧЭ.

#### Список литературы:

1. Доценко В.Н. Математическая модель движения поршня ДВС с учетом гидродинамических сил и моментов, возникающих в смазочном слое между поршнем и цилиндром / В.Н. Доценко, И.Н. Москаленко // Двигатели

внутреннего сгорания. – 2009. – № 2. – С. 57-59. 2. Рождественский Ю.В. Современные конструкции поршней для тепловых двигателей: учеб. пособие / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов; Мин-во образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский гос. Университет. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. 3. Габов А.П. Индуктивный конечный датчик в электроприводе / А.П. Габов, С.Н. Рыжов // Следящие электроприводы пром. установок, роботов и манипуляторов: тез. докл. Всесоюзная науч.-техн. конф. – Челябинск, 1989. – С. 1 – 9. 4. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник: пер. с англ. / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с. 5. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства. Справочник радиолюбителя / Издательство «Наукова думка»; Р.М. Терещук, К.М. Терещук, С.А. Седов. – К., 1981. – 670 с. 6. Фишер, Дж.Э. Электроника от теории к практике: пер. с англ. / Дж.Э. Фишер, Х.Б. Гетланд. – М.: Энергия, 1980. – 400 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Docenko V.N. Matematicheskaja model' dvizhenija porshnja DVS s uchetom gidrodinamicheskikh sil i momen-tov, vznikajuwih v smazochnom sloe mezhdu porshnem i cilindrom / V.N. Docenko, I.N. Moskalenko // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2009. – № 2. – S. 57-59. 2. Rozh-destvenskij Ju.V. Sovremennye konstrukcii porshnej dlja teplovyh dvigatelej: ucheb. posobie / Ju.V. Rozhde-stvenskij, K.V. Gavrilov; Min-vo obrazovanija i nauki Rossijskoj Federacii, Juzhno-Ural'skij gos. Univer-sitet. – Cheljabinsk: Izd-vo JuUrGU, 2009. 3. Gabov A.P. Induktivnyj konechnyj datchik v jelektroprivode / A.P. Gabov, S.N. Ryzhov // Sledjawie jelektroprivody prom. ustanovok, robotov i manipulatorov: tez. dokl. Vseso-juznaja nauch.-tehn. konf. – Cheljabinsk, 1989. – S. 1 – 9. 4. Frajden, Dzh. Sovremennye datchiki. Spravochnik: per. s angl. / Dzh. Frajden. – M.: Tehnosfera, 2005. – 592 s. 5. Poluprovodnikovyje priemno-usilitel'nye ustrojstva. Spravochnik radiojubitelja / Izdatel'stvo «Naukova dumka»; R.M. Terewuk, K.M. Terewuk, S.A. Sedov. – K., 1981. – 670 s. 6. Fisher, Dzh.Je. Jelektronika ot teorii k praktike: per. s angl. / Dzh.Je. Fisher, H.B. Getland. – M.: Jenergija, 1980. – 400 s.

УДК 621.436:681.51

**А.А. Прохоренко, канд. техн. наук**

## ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ДИЗЕЛЯ С АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМОЙ

Практически все транспортные дизели имеют в своем составе всережимный автоматический регулятор [1, 2]. В результате работа двигателя осуществляется по, так называемым, регуляторным характеристикам – совокупности режимов, для которых зависимость крутящего момента от частоты вращения устанавливается автоматически, без постороннего воздействия на орган управления топливopодачей [1]. Причем, эти регуляторные характеристики для транспортного дизеля должны быть статическими, то есть при изменении нагрузки на двигатель угловая скорость вращения коленчатого

вала должна изменяться. Однако, в некоторых случаях применения дизелей (например, для дизель-генераторных установок) требуется, чтобы поддержание заданного скоростного режима было очень точным и не зависело от нагрузки. Регуляторная характеристика, составляющая совокупность режимов с различной нагрузкой и постоянной угловой скоростью вращения коленчатого вала, называется астатической, а регулятор, обеспечивающий такую работу – прецизионным.

Для дизелей с традиционной гидромеханической топливной аппаратурой, регулирование которых достаточно просто осуществить с помощью