Досліджено можливість застосування ватметра, як множувально – інтегруючої ланки у вимірювачі середнього індикаторного тиску в поршневих двигунах при виконанні технологічного процесу діагностування під час технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів і дається аналіз областей їх застосування. У статті розглянуті питання нерівномірності навантаження циліндрів в двигунах внутрішнього згоряння

Ключові слова: двигуни внутрішнього згоряння, ресурс двигуна, коефіцієнт корисної дії

Исследована возможность применения ваттметра, в качестве множительно – интегрирующего звена в измерителе среднего индикаторного давления в поршневых двигателях при выполнении технологического процесса диагностирования во время технического обслуживания и ремонта транспортных средств и дается анализ областей их применения. В статье рассмотрены вопросы неравномерности нагружения цилиндров в двигателях внутреннего сгорания

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, ресурс двигателя, коэффициент полезного действия

УДК 621.81

ПРИМЕНЕНИЕ ВАТТМЕТРА В ИЗМЕРИТЕЛЕ СРЕДНЕГО ИНДИКАТОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Д. Ю. Зубенко
Кандидат технических наук, доцент
Кафедра электротранспорта
Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. О. Н. Бекетова
ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002

1. Введение

Самыми распространенными источниками получения механической энергии являются поршневые двигатели внутреннего сгорания, которые используют во многих отраслях производства, в том числе и на транспортных средствах.

В связи с расширением парка поршневых двигателей и повышением требований к эксплуатации значительно возрастают требования к надежности и долговечности их работы, уменьшения их влияния на окружающую среду [1 – 3]. Одним из основных вопросов эксплуатации является определение технического состояния двигателя внутреннего сгорания с целью прогнозирования его ресурса и надежности работы. Предлагаемый метод определения среднего индикаторного давления в двигателях внутреннего сгорания обосновывается необходимостью разработки качественных и недорогостоящих систем диагностики. Высокая надежность в процессе эксплуатации может быть достигнута путем правильного и своевременного контроля технического состояния изделий при проведении их технического обслуживания и ремонта.

Это выдвигает повышенные требования к средствам диагностирования. Особенно это важно при определении технического состояния сложных систем, в частности двигателей внутреннего сгорания. Следовательно, создание средств диагностирования поршневых двигателей является актуальным вопросом [4 – 6].

2. Анализ литературных данных и постановка задачи исследования

Постоянно совершенствуются требования, предъявляемые к двигателям внутреннего сгорания, по критерию надежности, экологичности и продлению ресурса [1]. Известно, что чем полнее сжигается топливо в двигателе, тем меньше токсичных продуктов сгорания будет выброшено в атмосферу. С другой стороны неравномерность нагружения цилиндров двигателя влияет на ресурс [2], определение же ресурса осуществляется по диаграммам с правочными коэффициентами [3]. Первый способ основывается на зависимости между ресурсом и средним индикаторным давлением, описываемым математической моделью. Целью данного способа является достижение оптимального, по определенным разработчиками критериям, крутящего момента с помощью соответствующего ему оптимального давления [4]. Вследствие сложности расчета происходящих в цилиндре процессов горения, в модели используется эмпирическое приближение к реальной физической картине этих процессов, и, следовательно, точность данного способа лимитируется вычислительным возможностям блока управления двигателем. Помимо

© Д. Ю. Зубенко, 2014

сложности расчетов, способ дополнительно усложняется большим количеством поправочных функций, использующихся в случае несоответствия фактического давления. При определении среднего индикаторного давления по диаграммам с поправочными коэффициентами, для расчета используется трехмерная поверхность, отражающая его зависимость от двух факторов, выбранных разработчиками основными, например, от нагрузки на двигатель и его оборотов. Обычно такая «базовая» поверхность заполняется по результатам испытаний контрольной партии двигателей, с оптимизацией по некоторому набору параметров, среди которых могут быть экономичность, экологичность, эластичность и т. д. Затем, чтобы учесть влияние условий окружающей среды и работы двигателя, базовое значение корректируется различными поправочными функциями или коэффициентами. При этом общее количество поправок для всех рабочих точек может быть довольно значительным, что приводит к усложнению алгоритма расчета давления и повышению требований к вычислительными ресурсам электронного блока управления двигателем [5, 6].

В данной статье предлагается новый способ определения среднего индикаторного давления, обеспечивающий достижение максимального момента, поскольку известно, что это улучшает индикаторные параметры двигателя и способствует наиболее полному сгорания топлива [7].

Поэтому целью исследования выбрано определение возможности применения ваттметра, в качестве множительно – интегрирующего звена в измерителе среднего индикаторного давления в поршневых двигателях внутреннего сгорания.

Необходимо решить задачу своевременной диагностики во время технического обслуживания и ремонта транспортных средств и проведения анализа областей их применения.

2. Возможности применения ваттметра в измерителе среднего индикаторного давления двигателей внутреннего сгорания

Среднее индикаторное давление в каждом цилиндре двигателя наиболее полно характеризует качество работы двигателя. Поэтому его наиболее целесообразно применять в качестве диагностического параметра. Среднее индикаторное давление определяется по формуле [7 – 9].

$$P_i = \frac{m\Pi}{T}\int_0^T P_t v_t dt, \qquad (1)$$

где P_i – среднее индикаторное давление газов в цилиндре двигателя;

P_t – текущее по времени давление газов в цилиндре двигателя;

m – число тактности двигателя которое для двухтактных двигателей равно 1, а для четырехтактных двигателей 2;

T – продолжительность одного цикла.

В выражении (1) сомножители v_t и P_t являются временными периодическими функциями, удовлетворяющими условиям Дирихле. Знакопеременная функция v_t, период измерения которой определяется числом оборотов двигателя в минуту n, представляет собой отношение мгновенной скорости к средней скорости движения поршня, умноженное на 2π. Ее обычно представляют в виде формулы:

$$v_t = \sin\left(\frac{2m\pi}{T}\cdot t\right) + \frac{v}{2}\cdot \sin 2\cdot\left(\frac{2m\pi}{T}\cdot t\right). \qquad (2)$$

Из анализа этого выражения видно, что эта функция зависит только от отношения радиуса кривошипа к длине шатуна λ. Функция определяется из индикаторной диаграммы полученной экспериментально, как и среднее индикаторное давление. Из анализа выражения (1) видно, что для определения среднего индикаторного давления необходимо алгебраическое умножение функций P_t и v_t с последующим интегрированием за цикл. Аналогичная задача решается ваттметром при измерении среднего значения активной мощности P за период T, используя зависимость: $P = \frac{1}{T}\int_0^T P_t t_t dt$ (здесь U_t и t_p – мгновенное значение напряжения и тока).

Структурная схема измерителя среднего индикаторного давления P_i, реализующая зависимость (1), представлена на рис. 1. Принцип работы этого измерителя заключается в следующем. Текущее значение давления газов P_t в цилиндре двигателя преобразуется датчиком 1 в пропорциональный электрический сигнал, который после усиления усилителем 2 подается на потенциальный вход ваттметра 3. Текущее угловое положение коленчатого вала двигателя φ преобразуется датчиком ''положение поршня'' 4 в сигнал v_t, который через усилитель 5 подается на токовый вход ваттметра 3. Показания стрелочного индикатора будут пропорциональны величине среднего индикаторного давления P_i.

Точность измерения зависит от соотношения полосы частот, пропускаемых преобразовательно – измерительным трактом прибора, и спектра частот, содержащихся в сигналах P_t и v_t.

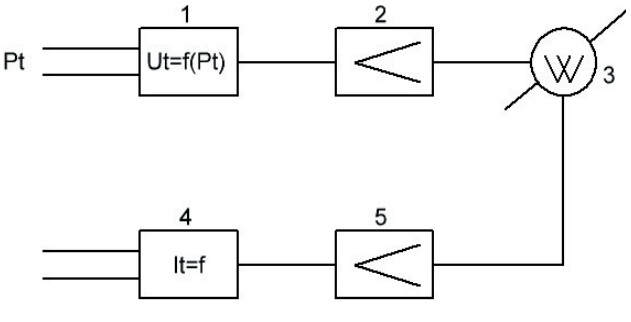


Рис. 1. Структурная схема измерителя среднего индикаторного давления: 1, 4 — модульный блок, 2, 5 — анализатор, 3 — ваттметр

Спектр частот определяется разложением этих функций в ряд Фурье. Из графика (рис. 2), построенного по данным Пражского научно – исследовательского института нефтяных моторов [10 – 13], можно сделать вывод, что для обеспечения погрешности в

воспроизведении функции P_t, не превышающей 1 %, необходимо учитывать гармоники вплоть до 150 порядка. Верхние пределы частот для сигналов P_t и v_t, соответственно равны

$$f_{P_t} = 150\frac{n}{60} = 2{,}5n\,, \tag{3}$$

$$f_{v_t} = 2\frac{n}{60} = \frac{1}{30}n\,. \tag{4}$$

Анализ литературных источников показал, что частота вращения серийных (промышленных) поршневых двигателей не превышает 1500 об/мин и, следовательно, верхний предел частот составит

$$f_{P_t} = 3{,}75\cdot 10^3\,, \tag{5}$$

$$f_{v_t} = 50\,. \tag{6}$$

С целью упрощения преобразовательно – усилительного тракта и стабилизации его работы применяют амплитудную модуляцию несущей частоты 10 – 200 кГц по закону изменения давления с последующим детектированием. При детектировании слабых сигналов наблюдается повышенное искажение формы сигнала, а значит и рост погрешностей при изменении P_i, что нежелательно, так как большая доля процесса в цилиндре четырехтактного двигателя протекает при низких давлениях. Поэтому есть смысл производить операции умножения и интегрирования непосредственно на несущей частоте.

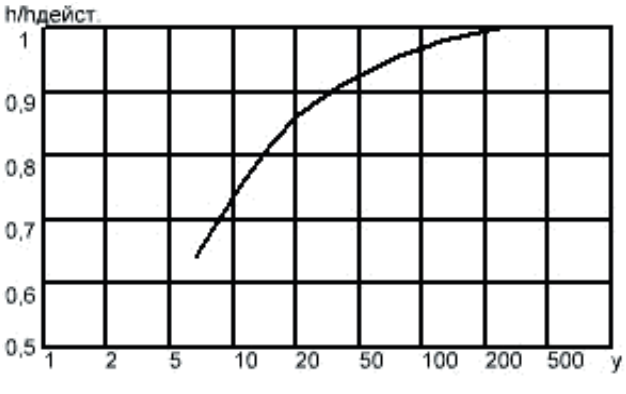


Рис. 2. Экспериментально полученный спектр частот, содержащихся в сигналах P_t и v_t

У лучших отечественных электродинамических ваттметрах гарантируется погрешность + 0,5 %; – 0,5 % в области расширенных частот до $5\cdot 10^3$ Гц [4]. Дальнейшее расширение области рабочих частот достигается применением приборов в астатическом исполнении с оптическими указателями.

Основные их недостатки – это большое собственное потребление мощности, чувствительность к внешним полям и необходимость в температурной и частотной компенсации [14 – 17].

Ферродинамические ваттметры имеют значительно меньше собственное потребление энергии, но расширенная область частот достигает только 500 Гц, где гарантируется погрешность ± 10 %. Поэтому их нецелесообразно применять при создании приборов для измерения среднего индикаторного давления.

Существует большое количество схем электронных ваттметров, основанных на принципе возведения в квадрат суммы и разности мгновенных значений напряжения и тока с последующим вычислением полученных результатов:

$$(a+b)^2 - (a-b)^2 = 4ab\,. \tag{7}$$

На рис. 3 изображена схема ваттметра на нелинейных элементах 1 и 2 с идентичными вольтамперными характеристиками вида

$$i = au + bu^2\,. \tag{8}$$

Падение напряжения U_i на резисторах R_2 равны между собой, пропорциональны току i_t и совпадают с ним по фазе, то есть

$$U_i = k_i \cdot i_t\,, \tag{9}$$

где k_i – коэффициент пропорциональности.

В цепи нелинейных элементов 1 и 2 вводятся напряжения $U_i^{'}$ и $U_i^{''}$, которые можно представить выражениями

$$\begin{cases} U^{'} = U_t + U_i, \\ U^{''} = -U_t + U_i. \end{cases} \tag{10}$$

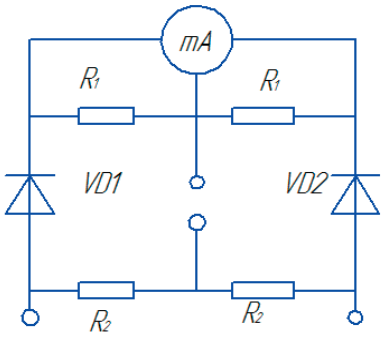


Рис. 3. Схема подключения ваттметра

Показания магнитоэлектрического прибора 3 пропорциональны разности между падениями напряжений, создаваемых постоянными составляющими токов $i_i^{'}$ и $i_i^{''}$ нелинейных элементов на одинаковых резисторах То есть, показания пропорциональны разности токов $i_i^{'}$ и $i_i^{''}$, которая равна

$$I_o = \frac{1}{T}\int_0^T 4bU_tU_i dt = 4bk_uk_i\frac{1}{T}\int_0^T U_ti_t dt = \frac{k}{T}\int_0^T U_ti_t dt\,. \tag{11}$$

Кроме того в качестве нелинейных элементов с характеристиками вида (11) в схемах ваттметров применяют различные полупроводниковые приборы, дроссели насыщения, карборундовые резисторы и другие нелинейные сопротивления. Основные достоинства этих схем: широкий диапазон рабочих частот, высокая механическая прочность, малые габариты, долговечность, незначительное собственное потребление энергии. К недостаткам следует

отнести: сильный разброс вольтамперных характеристик и связанную с ним относительно большую погрешность, нарушение зависимости (11) в районе около нуля и влияние температуры внешней среды. Повышение максимального давления сгорания и скорости его нарастания приводит к увеличению статических и динамических нагрузок на детали силовой схемы двигателя, что ухудшает условия смазки механических сопряжений в кривошипно-шатунном механизме и в подшипниках коленчатого вала и способствует росту механической усталости материала. Более высокая температура рабочего цикла вызывает тепловые перенапряжения в деталях цилиндропоршневой группы и ухудшает условия смазки гильзы цилиндра.

Все это, в конечном счете, приводит к более быстрому изнашиванию поршневых колец, гильз цилиндров, поршней и вкладышей подшипников коленчатого вала, то есть приводит к снижению ресурса двигателя.

Низкие значения максимального давления сгорания, как правило, сопряжены с низкими значениями температуры рабочего цикла, то есть с догоранием топлива. В процессе расширения, которое сопровождается неполнотой сгорания топлива и появлением нагарообразования, происходит смывание несгоревшим топливом масляной пленки с гильз цилиндров и повышение температуры отработавших газов.

Снижение температуры рабочего цикла приводит к увеличению зазоров в сопряжении гильза-цилиндр, к большим ударным нагрузкам при перекладке поршня и к повышенным кавитационным разрушениям гильз цилиндров.

Вследствие этого ресурс как цилиндра с поршневой группой, так и всего двигателя, будет резко снижаться.

Из изложенного видно, что оптимальное значение индикаторного коэффициента полезного действия выбирается из условия получения достаточного ресурса двигателя и приемлемого расхода топлива, то есть заранее предполагается, что двигатели работают не с максимальным коэффициентом полезного действия.

В системах электроснабжения объектов транспорта и инфраструктуры города применяется многоцилиндровые двигатели, у которых индикаторный коэффициент полезного действия является средним показателем, характеризующим работу цилиндров.

$$\eta_{iт} = \frac{1}{i}\sum_{1}^{i}\eta_i , \qquad (12)$$

где $\eta_{iт}$ – индикаторный коэффициент полезного действия двигателя или его среднее значение по цилиндрам.

Тогда, очевидно, индикаторный коэффициент полезного действия целесообразно использовать в качестве интегрального диагностического параметра отдельных цилиндров двигателя, позволяющего в процессе эксплуатации осуществлять контроль степени неравномерности распределения нагрузки по цилиндрам.

Исходя из этого, после преобразования выражение (5) будет иметь вид:

$$\sigma = 1 - \frac{\eta_{iк}}{\frac{1}{i}\sum_{i}\eta_i}, \qquad (13)$$

где $\eta_{iк}$ – индивидуальный коэффициент полезного действия, характеризующий нагрузку К-го цилиндра и использующийся в качестве интегрального диагностического параметра.

Для определения показаний применяются магнитоэлектрические приборы, в которых имеет место пропорциональность разности между падениями напряжений, создаваемых постоянными составляющими токов i_i' и i_i'' нелинейных элементов на одинаковых резисторах R_1. То есть показания пропорциональны разности токов i_i' и i_i'', которая определяется по формуле (12)

$$I_o = \frac{1}{T}\int_0^T 4bU_tU_i dt = 4bk_uk_i\frac{1}{T}\int_0^T U_ti_t dt = \frac{k}{T}\int_0^T U_ti_t dt . \qquad (14)$$

Кроме того, в качестве нелинейных элементов с характеристиками вида (5) в схемах ваттметров применяют различные полупроводниковые приборы, дроссели насыщения, карборундовые резисторы и другие нелинейные сопротивления. Основные достоинства этих схем: широкий диапазон рабочих частот, высокая механическая прочность, малые габариты, долговечность, незначительное собственное потребление энергии.

К недостаткам следует отнести: сильный разброс вольтамперных характеристик и связанную с ним относительно большую погрешность, нарушение зависимости (11) в районе около нуля и влияние температуры внешней среды.

Ваттметры с линейным преобразованием могут быть выполнены на полупроводниковых элементах – датчиках Холла [17 – 19].

6. Выводы

При создании приборов для непосредственного измерения среднего индикаторного давления в качестве множительно-интегрирующего звена могут быть использованы ваттметры:

– электродинамические при применении генераторных датчиков давления (пьезоэлектрических) и «положение поршня», когда сигналы имеют достаточную мощность, и граничная частота определяется числом оборотов двигателя;

– выполненные на элементах с квадратичными вольтамперными характеристиками, когда датчики давлении и «положение поршня» питаются током частоты 10–200 кГц (проволочная и полупроводниковая тензометрия, емкостные и индуктивные преобразователи);

– основанные на эффектах Холла в сочетании с любыми типами датчиков, когда температурный фактор не является определяющим.

– предлагаемое устройство имеет область возможного применения во всех типах двигателя внутреннего сгорания.

– исследована возможность применения ваттметра, в качестве множительно – интегрирую-

щего звена в измерителе среднего индикаторного давления в поршневых двигателях при выполнении технологического процесса диагностирования во время технического обслуживания и ремонта транспортных средств и дается анализ областей их применения.

– рассмотрены вопросы неравномерности нагружения цилиндров в двигателях внутреннего сгорания.

Литература

1. Кузнецов, И. В. Снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами при улучшении топливной экономичности двигателя с искровым зажиганием путем расслоения заряда в цилиндре [Текст] / И. В. Кузнецов, А. М. Сычев // Экология и промышленность России. – 2014. – № 2. –С. 4–8.
2. Нечаев, Е. П. Безразборный контроль интенсивности изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы дизелей [Текст] / Е. П. Нечаев // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16, № 4. – С. 771–776.
3. Обозов, А. А. Математическое имитационное моделирование рабочего процесса автомобильного двс в целях получения диагностической информации [Текст] / А. А. Обозов, В. И. Таричко // Двигателестроение. – 2013. – № 2. – С. 21–25.
4. Аврамчук, В. С. Анализ сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания [Текст] / В. С. Аврамчук, В. П. Казьмин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 5. – С. 69–73.
5. Болоев, П. А. Моделирование процесса сгорания газомоторного топлива в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / П. А. Болоев, О. Н. Хороших // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – Т. 3, № 57-3. – С. 91–101.
6. Крашенинников, С. В. Современные подходы к диагностированию дизельных двигателей внутреннего сгорания [Текст] / С. В. Крашенинников // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. – 2013. – № 2 (12). – С. 59–68.
7. Дьяконов, М. Ю. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов [Текст] / М. Ю. Дьяконов, В. В. Зайцев, Ю. С. Бахрачева // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2013. – № 4 (4). – С. 193–196.
8. А. с. № 5337821 (СССР). Электронный метод измерения среднего индикаторного давления поршневого двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Голтвянский Н. А. и др. – опубл. 30.10.2006. – бюл. № 71-4 с.
9. Демидова-Панферова, Р. М. Электрические измерения [Текст] : 2-е изд. с изменен. и дополн. / Р. М. Демидова-Панферова, В. Н. Малиновский, В. С. Попова; под ред. В. Н. Малиновского. – М.:Энергоиздат., 2007. – 392 с.
10. Стечкин, Б. С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя [Текст] / Б. С. Стечкин, К. И. Генкин, В. С. Золотаревский. – М. Энергия, 2005. – 287 с.
11. Шкурин, Г. П. Справочник по новым электроизмерительным приборам [Текст] / Г. П. Шкурин. – М.: Воениздат, 2008. – 48 с.
12. Полулях, К. С. Электронные измерительные приборы [Текст] / К. С. Полулях. – Киев, «Техника», 2001. – 203 с.
13. Терешин, А. И. Справочник по эксплуатации радиоизмерительных приборов [Текст] / А. И. Терешин, В. А. Сафронов. – Киев, «Техника», 2009. – 307 с.
14. Ремесз, Г. А. Курс основных радиотехнических измерений [Текст] / Г. А. Ремесз. – М., Энергия, 2002. – 373 с.
15. Вахитов, А. Р. Радиоизмерения на сверхвысоких частотах [Текст] / А. Р. Вахитов. – М. Воениздат., 1997. – 315 с.
16. Фремке, А. В. Телеизмерения [Текст] / А. В. Фремке. – М., Высшая школа, 2008. – 270 с.
17. Шорников, Е. А. Измерительно-вычислительные приборы в теплоэнергетике [Текст] / Е. А. Шорников. – М., Энергия, 2007. – 349 с.
18. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] / под редакцией А. С. Орлина. – М.: Машгиз. – 2007. – Т. 1. – 338 с.
19. Михалин, Г. И. Эксплуатация стационарных дизелей [Текст] / Г. И. Михалин. – М., Воениздат., 1995. – 305 с.