

ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЯ УГЛОВОЙ ШКАЛЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОДНОЦИЛИНДРОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

EVALUATION OF THE OFFSET OF THE ANGULAR SCALE TO IMPROVE THE CONTROL ACCURACY OF THE SINGLE-CYLINDER ENGINE

П.В. АБРАМОВ, к.т.н.

ОП ООО «НПП «ИТЭЛМА», Владимир, Россия,
abhvp@yandex.ru

P.V. ABRAMOV, PhD in Engineering

LLC Scientific Production Enterprise ITELMA, Vladimir, Russia,
abhvp@yandex.ru

Существенного снижения затрат на управление одноцилиндровым двигателем с принудительным воспламенением для средств малой механизации можно добиться путем замены материальных датчиков виртуальными. Необходимая для управления информация может быть извлечена из частоты вращения коленчатого вала. Достоверность оценки состава смеси по внутрицикловой вариации угловой скорости коленчатого вала зависит от множества факторов, в том числе и от точности установки датчика положения данного вала и диска синхронизации либо другого элемента для определения углового положения коленчатого вала в выбранной системе отсчета.

Выявлены свойства одноцилиндрового двигателя, позволяющие значительно ослабить влияние смещения угловой шкалы на точность оценки состава смеси по кинематическим параметрам работы двигателя, а также произвести оценку самого смещения.

Эксперименты проведены на двигателе общего назначения Honda iGX440 с рабочим объемом 0,44 л, оснащенном опытной электронной системой управления впрыскиванием топлива, зажиганием и дросселированием. Нагрузкой служил гидротормоз.

Смещение угловой шкалы может быть определено различными способами: по отклонению фазы гармоники кинетической энергии кривошипно-шатунного механизма любого наблюдаемого порядка в экстремуме зависимости данной фазы от угла опережения зажигания при прочих равных условиях; по сдвигу производной по углу опережения зажигания указанной зависимости; по сдвигу зависимости разности данной фазы и угла опережения зажигания от последнего; по отклонению фазы гармоник кинетической энергии кривошипно-шатунного механизма высших порядков при угле опережения зажигания, нивелирующем действие смещения шкалы на фазу основной гармоники кинетической энергии кривошипно-шатунного механизма.

Уточнение положения коленчатого вала за счет оценки смещения шкалы предложенными способами позволит сохранить необходимую точность управления углом опережения зажигания на одноцилиндровых двигателях при увеличении допуска на установку элементов для определения углового положения коленчатого вала.

Ключевые слова: одноцилиндровый двигатель, смещение угловой шкалы, фазовый регулятор состава смеси.

Для цитирования: Абрамов П.В. Оценка смещения угловой шкалы для повышения точности управления одноцилиндровым двигателем // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2021. № 5. С. 55–64. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-5-55-64

A significant reduction in the cost of controlling a single-cylinder engine with positive ignition for small-scale mechanization can be achieved by replacing material sensors with virtual ones. The information required for control can be extracted from the crankshaft speed. The reliability of the mixture composition estimate based on the intracycle variation of the crankshaft angular velocity depends on many factors, including the installation accuracy of the position sensor of the given shaft and the synchronization disk or other element for determining the angular position of the crankshaft in the selected reference system.

The properties of a single-cylinder engine are revealed. These make it possible to significantly weaken the effect of the displacement of the angular scale on the accuracy of assessing the composition of the mixture by the kinematic parameters of the engine operation, as well as to evaluate the displacement itself.

The experiments were carried out on a general-purpose engine Honda iGX440 with a displacement of 0,44 liters, equipped with an experimental electronic control system for fuel injection, ignition and throttling. The hydraulic brake was used as the load.

The displacement of the angular scale can be determined in various ways: by the deviation of the phase of the harmonic of the kinetic energy of the crank mechanism of any observed order at the extremum of the dependence of this phase on the ignition timing, all other things being equal; by the shift of the derivative with respect to the ignition timing of the specified dependency; by the shift of the dependence of the difference of this phase and the ignition timing from the latter; by the deviation of the phase of the harmonics of the kinetic energy of the crank mechanism

of higher orders at the ignition timing, leveling the effect of the displacement of the scale on the phase of the fundamental harmonic of the kinetic energy of the crank mechanism.

Refinement of the position of the crankshaft by evaluating the displacement of the scale by the proposed methods will preserve the necessary accuracy of control of the ignition advance angle on single-cylinder engines while increasing the tolerance for the installation of elements for determining the angular position of the crankshaft.

Keywords: single-cylinder engine, offset angle scale, phase regulator of the mixture ratio.

Cite as: Abramov P.V. Evaluation of the offset of the angular scale to improve the control accuracy of the single-cylinder engine. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021. No 5, pp. 55–64 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-5-55-64

Введение

Одним из основных типов двигателя для средств малой механизации (СММ) в настоящее время остается четырехтактный одноцилиндровый бензиновый двигатель внутреннего сгорания (ДВС). И, несмотря на расширение применения автономного электропривода, альтернатива данному типу ДВС в ближайшие годы вряд ли появится, особенно там, где эти двигатели приводят в действие электрогенераторы.

По техническому уровню двигатели для СММ существенно уступают двигателям другого назначения, например автомобильным и мотоциклетным, в том числе и одноцилиндровым. Причина заключается в необходимости сохранения низкой стоимости двигателя. Поэтому до сих пор на них применяются простейший карбюратор и система зажигания практически с фиксированным углом опережения. Как следствие – низкая экономичность, высокие выбросы вредных веществ, отсутствие адаптации к изменяющимся внутренним и внешним условиям и т.д.

Ключевая система для повышения технического уровня двигателей данного типа – система топливоподачи. За последние годы предложено множество сравнительно простых решений в этой области: от карбюраторов с электроуправляемыми дозаторами топлива [1] до систем впрыскивания [2]. Но подобные системы пока не нашли широкого распространения, поскольку по стоимости они значительно превосходят применяемые карбюраторы. Заметную долю в стоимости создают датчики, необходимые для оценки циклового расхода воздуха. Кроме того, наличие этих датчиков снижает надежность системы топливоподачи.

Существенно снизить затраты на управление двигателем можно путем замены материальных датчиков виртуальными. В частности, в работах [3–5] делается упор на извлечение необходимой

для управления информации из частоты вращения коленчатого вала (КВ). Если оценка крутящего момента выполняется достаточно надежно по внутрицикловой вариации частоты вращения даже без учета параметров рабочего процесса, то на достоверность оценки состава смеси влияет значительное число факторов. Один из них – точность установки датчика положения КВ и диска синхронизации либо другого элемента для определения углового положения КВ в выбранной системе отсчета. Так, при оценке состава смеси по фазе основной гармоники квадрата угловой скорости КВ сдвиг угловой шкалы на 1° ПКВ (поворота коленчатого вала) приведет к ошибке в определении коэффициента избытка воздуха, составляющей порядка 3...5 % [6]. Следовательно, для удовлетворительной работы регулятора состава смеси с обратной связью по оценке коэффициента избытка воздуха, выполненной по фазовым величинам [7], необходимо знать угловое положение КВ с точностью до десятых долей градуса ПКВ.

В процессе поиска способа для оценки величины смещения угловой шкалы были выявлены свойства одноцилиндрового двигателя, позволяющие, с одной стороны, значительно ослабить влияние смещения шкалы на точность оценки состава смеси по фазовым величинам и, с другой стороны, произвести оценку самого смещения.

Цель исследований

Установить влияние смещения угловой шкалы на точность регулирования состава смеси регулятором с обратной связью по фазовым параметрам внутрицикловой вариации угловой скорости КВ, а также выявить возможность определения этого смещения в эксплуатационных условиях, тем самым устранив одну из причин, препятствующих практическому применению виртуальных датчиков на основе кинематики ДВС.

Материалы и методы

Экспериментальное исследование выполнено на двигателе общего назначения с воздушным охлаждением Honda iGX440 рабочим объемом 0,44 л. Для варьирования состава смеси и угла опережения зажигания (УОЗ) в широких пределах, а также для поддержания заданной частоты вращения двигатель был оснащен опытной электронной системой управления впрыскиванием топлива, зажиганием и дросселированием. Нагрузкой служил гидротормоз, управляемый общим с двигателем электронным блоком. Угловое положение КВ определялось посредством оптического датчика и диска синхронизации с 60 затененными секторами. За начало отсчета взята верхняя мертвая точка такта пуска.

Эксперименты проводились на двух скоростных и нагрузочных режимах – при установленной производителем минимальной частоте вращения $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ без внешней нагрузки и при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ и нагрузке около 50 %. Поскольку в условиях эксплуатации отсутствует возможность для прямого измерения крутящего момента, то оценка нагрузки производилась по амплитуде основной (порядка $1/2$) гармоники кинетической энергии вращающихся и связанных с ними масс двигателя (моменты инерции тормоза и приводного вала не учитывались ввиду их малости). Задаваемое значение этой амплитуды поддерживалось тормозом. При этом эффективный крутящий момент не оставался постоянным. Варьирование состава смеси и УОЗ в широких пределах приводило к его изменению не более чем на 5 %.

Влияние УОЗ и состава смеси на спектр кинетической энергии вращающихся и связанных с ними масс двигателя (далее для краткости – кинетической энергии КШМ – кривошипно-шатунного механизма) определялось посредством анализа регулировочных характеристик по УОЗ, снятых при различных составах смеси и постоянной нагрузке (амплитуде основной гармоники кинетической энергии). Заданное значение коэффициента избытка воздуха при этом поддерживалось регулятором с широкополосным лямбда-зондом в контуре обратной связи. Характеристики снимались при следующих значениях коэффициента избытка воздуха α : 0,75 – переобогащенная смесь; 0,85 – область мощностного состава; 1,0 – стехиометрический состав; 1,15 – область экономичного состава; 1,25 – переобедненная смесь.

Действие смещения угловой шкалы на спектр кинетической энергии КШМ определялось расчетным путем на основе экспериментально полученных зависимостей параметров спектра от УОЗ при номинальном положении угловой шкалы.

Реакция фазового регулятора состава смеси на смещение угловой шкалы выявлялась на режиме холостого хода при минимальной частоте вращения и различных УОЗ. Смещение шкалы задавалось программно. Детальную информацию о самом фазовом регуляторе можно найти в работе [7]. В качестве параметра обратной связи по составу смеси в данном регуляторе используется фаза основной гармоники кинетической энергии КШМ.

Результаты и обсуждение

Изменение фазы $\Psi_{T \frac{1}{2}}$ основной гармоники кинетической энергии КШМ в зависимости от угла опережения зажигания Θ_3 при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, нагрузке порядка 50 % и выбранных составах смеси показано на рис. 1.

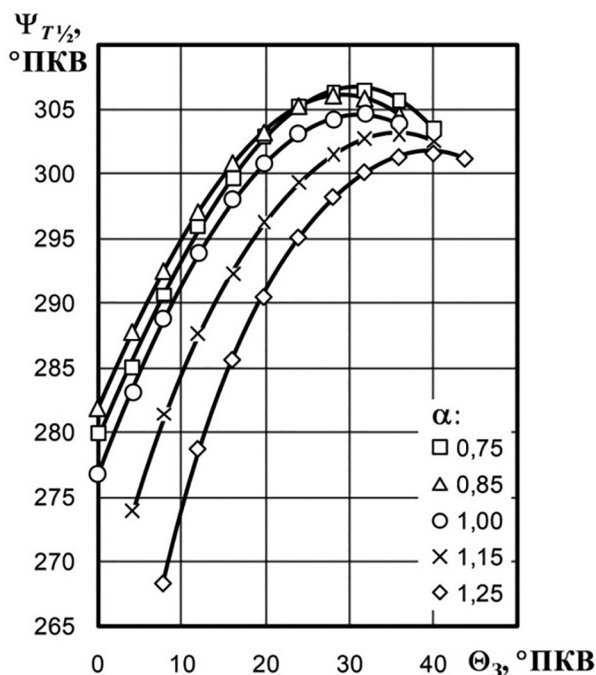


Рис. 1. Зависимость фазы основной гармоники кинетической энергии КШМ от угла опережения зажигания при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, нагрузке около 50 % и различных составах смеси

Fig. 1. Dependence of the phase of the fundamental harmonic of the kinetic energy of the crank mechanism on the ignition timing at $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, load of about 50 % and different mixture compositions

Характерной особенностью данной зависимости является наличие максимума. Причем его угловое положение и величина фазы в экстремуме зависят от состава смеси: чем богаче смесь, тем больше фаза и меньше УОЗ, при котором наблюдается максимум. Последнее справедливо только до области мощностного состава. При дальнейшем обогащении максимум начинает смещаться в сторону увеличения УОЗ. Общим для всех представленных зависимостей является то, что максимумы лежат правее относительно оптимальных УОЗ приблизительно на $3...5^\circ$ ПКВ, то есть вне области реализуемых на практике УОЗ.

Указанный экстремум примечателен тем, что вблизи него УОЗ практически перестает влиять на фазу основной гармоники кинетической энергии. Следовательно, здесь смещение угловой шкалы будет оказывать наибольшее влияние. Собственно, насколько изменится положение шкалы, на столько изменится и фаза. Это приведет к существенной ошибке в работе фазового регулятора состава смеси. Поэтому следует избегать работы двигателя в области максимума фазы основной гармоники кинетической энергии не только по причине завышенного относительно оптимума УОЗ, но и из-за максимальной чувствительности в этой области фазового регулятора состава смеси к смещению угловой шкалы.

Количественно действие УОЗ на фазу основной гармоники кинетической энергии характеризует частная производная указанной фазы по УОЗ. Значения данной производной можно выразить как в $^\circ\text{ПКВ}/^\circ\text{ПКВ}$, так и в безразмерных единицах. На рис. 2. представлены такие производные, построенные по сглаженным данным рис. 1.

Судя по графикам, наибольшее влияние УОЗ наблюдается при меньших значениях последнего. По мере роста УОЗ производная по близкому к линейному закону уменьшается до нуля (максимум фазы) и затем меняет свой знак. Для каждого состава смеси существует УОЗ, при котором производная равна 1. Это важнейшее для фазового регулирования свойство одноцилиндрового двигателя. Оно заключается в том, что фаза меняется практически на столько, на сколько меняется УОЗ (в сравнительно небольших пределах изменения последнего). Благодаря этому небольшое смещение угловой шкалы не приведет к заметному изменению фазы, так как данное сме-

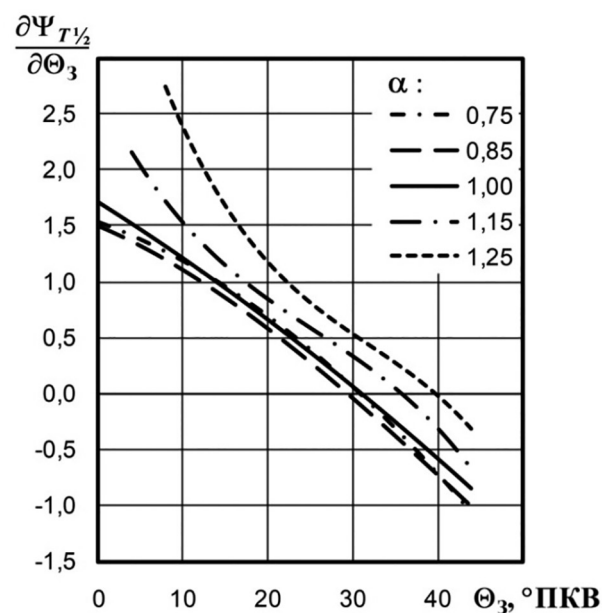


Рис. 2. Зависимость производной по углу опережения зажигания фазы основной гармоники кинетической энергии КШМ от угла опережения зажигания при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, нагрузке около 50 % и различных составах смеси

Fig. 2. Dependence of the derivative with respect to the ignition timing of the phase of the fundamental harmonic of the kinetic energy of the crank mechanism on the ignition timing at $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, load of about 50 % and different mixture compositions

щение вызовет изменение фактического УОЗ, а он, в свою очередь, почти на ту же величину сместит фазу. В итоге значение фазы останется практически неизменным, и значимой ошибки в работе фазового регулятора не будет. Таким образом, для каждого состава смеси на одном скоростном и нагрузочном режиме существует УОЗ, при котором смещение угловой шкалы не оказывает существенного влияния на фазу основной гармоники кинетической энергии КШМ. Этот УОЗ может быть найден в процессе калибровки системы управления двигателем либо в условиях эксплуатации с помощью производной данной фазы по УОЗ.

Другой способ нахождения УОЗ, нивелирующего действие смещения угловой шкалы на фазу основной гармоники кинетической энергии КШМ, заключается в поиске максимума зависимости разности данной фазы и самого УОЗ от последнего: $\Psi_{\tau \frac{1}{2}} - \Theta_3 = f(\Theta_3)$. Это обусловлено тем, что производная функции вида: $y = f(x) - x$ — равна 0 при том же значении x , при котором производная функции

вида: $y = f(x)$ – равна 1. На рис. 3 приведены указанные зависимости, построенные по сглаженным данным рис. 1. По ним можно убедиться в том, что максимумы приходятся на те же углы, что и единичные значения производной $\partial\Psi_{T_{1/2}}/\partial\Theta_3$. В отличие от производной, здесь достаточно найти область по УОЗ, где значение разности $(\Psi_{T_{1/2}} - \Theta_3)$ будет наибольшим. Эти углы находятся также либо экспериментально на этапе калибровки системы управления двигателем, либо, если двигатель работает значительную часть времени на установившихся режимах, автоматически в процессе эксплуатации. Причем точный максимум не требуется. Если при поисковых воздействиях разность $(\Psi_{T_{1/2}} - \Theta_3)$ будет изменяться незначительно, это означает, что УОЗ сдвигает фазу на столько, на сколько изменяется сам, то есть имеет место условие для нивелирования смещения угловой шкалы. Состав смеси при этом не должен изменяться. Поэтому устройство до-

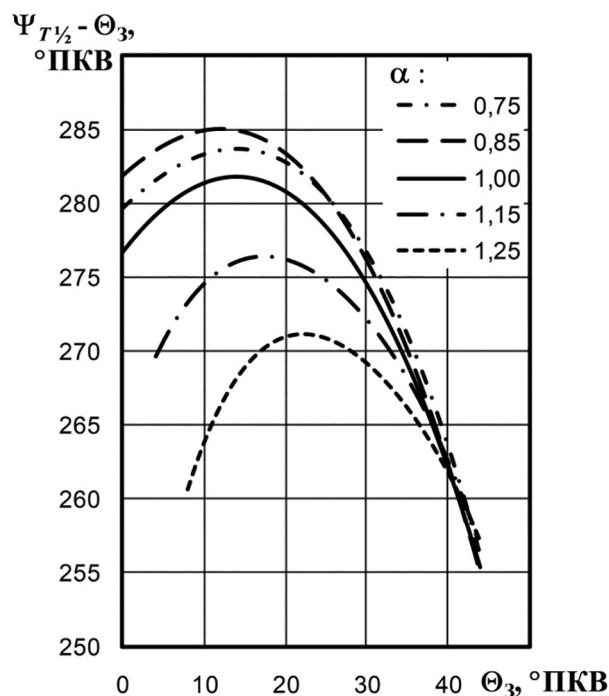


Рис. 3. Зависимость разности фазы основной гармоники кинетической энергии КШМ и угла опережения зажигания от последнего при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, нагрузке около 50 % и различных составах смеси

Fig. 3. Dependence of the phase difference of the fundamental harmonic of the kinetic energy of the crank mechanism and the ignition timing on the latter at $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, load of about 50 % and different mixture compositions

зирования топлива должно работать по «естественной» характеристике, без обратной связи по составу смеси.

К сожалению, УОЗ, при котором достигается максимум разности $(\Psi_{T_{1/2}} - \Theta_3)$, значительно отличается от оптимального – меньше на 13...15° ПКВ (для вышеуказанных условий). По этой причине переход в область пониженного влияния смещения шкалы может происходить только для более точной оценки состава смеси, а также для определения самого смещения.

Справедливость вышеприведенных выводов относительно нивелирования смещения угловой шкалы подтверждается как теоретически, так и экспериментально. Смещение шкалы является геометрическим фактором, и действие его выражается в сдвиге графика зависимости $\Psi_{T_{1/2}} = f(\Theta_3)$ вдоль координатных осей на величину самого смещения (по каждой оси). По оси Θ_3 сдвиг обусловлен отклонением фактического УОЗ от номинального на величину смещения, а по оси $\Psi_{T_{1/2}}$ – смещением на ту же величину начала отсчета, относительно которого определяется начальная фаза гармоники. В результате график рассматриваемой зависимости перемещается вдоль прямой, составляющей с каждой осью угол в 45°. Данную прямую можно провести, например, через точку D , где производная $\partial\Psi_{T_{1/2}}/\partial\Theta_3$ при номинальном положении шкалы равна 1 (прямая a на рис. 4). Тогда эта прямая будет касательной для всех кривых, различающихся только величиной смещения шкалы. Пересечение кривых с разным смещением будет иметь место под этой касательной. И чем больше смещение, тем дальше от точки D отстоит точка пересечения с кривой, полученной при номинальном положении шкалы. Следствием этого является рост разности фаз со смещением и без него при соответствующем точке D УОЗ по мере увеличения смещения. Это скажется и на отклонении состава смеси.

Пример влияния смещения $\Delta\varphi_0$ угловой шкалы на зависимость $\Psi_{T_{1/2}} = f(\Theta_3)$ показан на рис. 4. Кривые при $\Delta\varphi_0 = \pm 3^\circ$ ПКВ (половина шага одноименных секторов диска синхронизации) получены из исходной зависимости путем ее сдвига по координатным осям на величину смещения. Исходная зависимость, в свою очередь, построена по сглаженным данным рис. 1 для стехиометрического состава смеси. Вблизи $\Theta_3 = 14^\circ$ ПКВ, где производная фазы по УОЗ равна 1, наблюдается минимальное расхожде-

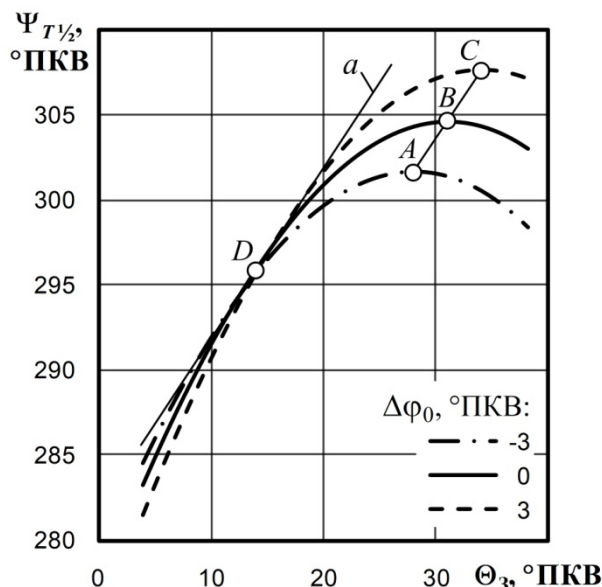


Рис. 4. Влияние смещения угловой шкалы на зависимость фазы основной гармоники кинетической энергии КШМ от угла опережения зажигания при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, нагрузке около 50 % и $\alpha = 1$

Fig. 4. The influence of the displacement of the angular scale on the dependence of the phase of the fundamental harmonic of the kinetic energy of the crank mechanism on the ignition timing at $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, load of about 50% and $\alpha = 1$

ние в значениях $\Psi_{T \frac{1}{2}}$ при наличии смещения и без него. Таким образом, на рассматриваемом режиме при номинальном (не фактическом) УОЗ около 14° ПКВ смещение угловой шкалы в пределах $\pm 3^\circ$ ПКВ не вызовет значимого изменения фазы основной гармоники кинетической энергии КШМ.

По этим же графикам можно получить представление о величине смещения. Наиболее надежно оно определится по разности значений фазы в соответствующих экстремумах (точки A, B и C на рис. 4): при смещении в 3° ПКВ $\Delta\varphi_0 = \Psi_{T \frac{1}{2} C} - \Psi_{T \frac{1}{2} B}$; при смещении в -3° ПКВ $\Delta\varphi_0 = \Psi_{T \frac{1}{2} A} - \Psi_{T \frac{1}{2} B}$. Таким образом, в условиях эксплуатации необходимо сначала выполнить оценку состава смеси при нивелирующем действии смещения шкалы УОЗ (в области максимума $(\Psi_{T \frac{1}{2}} - \Theta_3)$) и затем, не меняя состава смеси, найти максимальное значение $\Psi_{T \frac{1}{2}}$ и по его разности с максимальным значением $\Psi_{T \frac{1}{2} 0}$ для данных условий определить смещение шкалы. «Узким местом» предложенной процедуры является необходимость в сохранении постоянства состава смеси при варь-

ировании УОЗ, что не всегда может быть соблюдено на практике. Поэтому не следует ограничиваться только данным способом.

В отношении производной $\partial\Psi_{T \frac{1}{2}}/\partial\Theta_3$ действие смещения шкалы выражается в ее сдвиге по оси УОЗ на величину смещения (рис. 5). Это свойство может быть использовано для нахождения смещения шкалы в лабораторных условиях, однако в условиях эксплуатации определение частной производной представляет собой сложную задачу, вследствие чего смещение вряд ли может быть найдено с требуемой точностью.

Аналогично производной ведет себя разность $(\Psi_{T \frac{1}{2}} - \Theta_3)$: сдвигается вдоль оси Θ_3 на величину смещения шкалы (см. рис. 5). Для нахождения смещения достаточно определить Θ_3 , соответствующий выбранному значению данной разности, и вычесть из него Θ_3 , при ко-

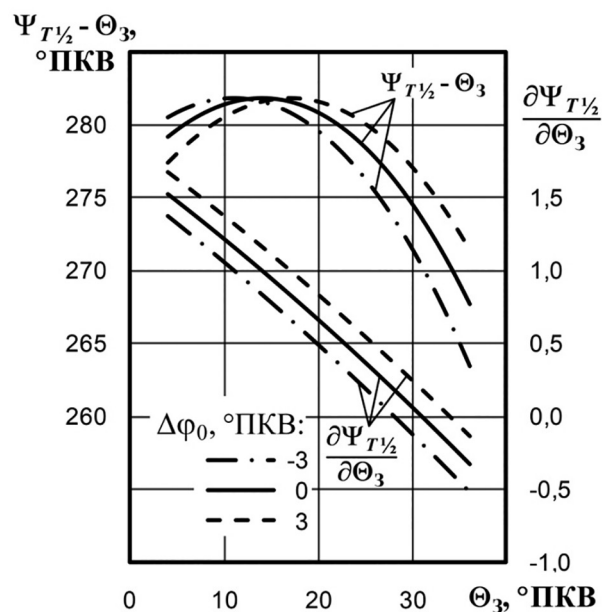


Рис. 5. Влияние смещения угловой шкалы на зависимость от угла опережения зажигания разности фазы основной гармоники кинетической энергии КШМ и угла опережения зажигания и производной данной фазы по углу опережения зажигания при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, нагрузке около 50 % и $\alpha = 1$

Fig. 5. The influence of the displacement of the angular scale on the dependence on the ignition timing of the phase difference of the fundamental harmonic of the kinetic energy of the crank mechanism and the ignition timing and the derivative of this phase with respect to the ignition timing at $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, load of about 50% and $\alpha = 1$

тором наблюдается то же самое значение в отсутствие смещения шкалы. Состав смеси оценивается так же, как и при нахождении смещения по $\Psi_{T \frac{1}{2}}$. Для более точного определения смещения необходимо, чтобы точка, в которой разность $(\Psi_{T \frac{1}{2}} - \Theta_3)$ равна выбранному значению, как можно дальше отстояла от максимума зависимости этой разности от Θ_3 – в области наибольшей чувствительности к изменению УОЗ. Но в этом случае необходимо соблюсти постоянство состава смеси при изменении УОЗ в процессе движения к целевой точке, что является существенным недостатком.

Ценность разности $(\Psi_{T \frac{1}{2}} - \Theta_3)$ состоит в отсутствии влияния смещения шкалы на ее значение в экстремуме. Данное свойство обуславливает ее преимущество как основного параметра для оценки состава смеси в области нивелирующего действия УОЗ.

Количественно степень влияния смещения шкалы на отклонение $\Delta\Psi_{T \frac{1}{2}}$ фазы основной гармоники кинетической энергии от ее значения при отсутствии смещения, а также на состав смеси для УОЗ, соответствующего единичной производной исходной зависимости $\Psi_{T \frac{1}{2}} = f(\Theta_3)$, можно проследить по графикам на рис. 6. Приведенные здесь зависимости получены расчетным путем. В расчете отклонения фазы использовались сглаженные данные для стехиометрического состава смеси, представленные на рис. 1. Состав смеси рассчитывался по экспериментально полученным при различных значениях УОЗ зависимостям $\alpha = f(\Psi_{T \frac{1}{2}})$. В качестве параметра брался фактический УОЗ, получающийся из номинального вычитанием смещения шкалы. На место аргумента подставлялось взятое с несмещенной зависимости $\Psi_{T \frac{1}{2}} = f(\Theta_3)$ значение фазы при единичной производной данной зависимости (установка для фазового регулятора состава смеси). Как следует из графиков, небольшое смещение шкалы – до 3° ПКВ – вызывает незначительное изменение фазы. Состав смеси также изменяется незначительно – приблизительно на 1 %. Причем изменяется исключительно в сторону обогащения смеси. Это является положительным моментом, так как в этом случае устойчивость работы двигателя возрастает (при отсутствии переобогащения), и управляющие воздействия могут производиться при отсутствии дополнительных помех, которые могли бы возникнуть вследствие неустойчивой работы двигателя.

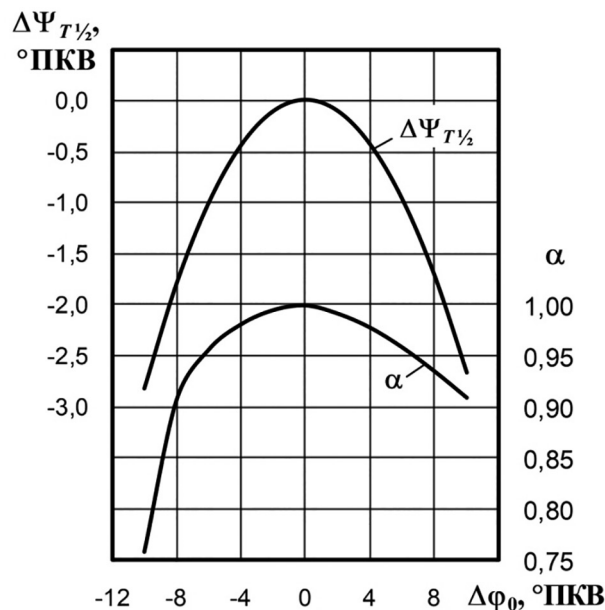


Рис. 6. Влияние смещения угловой шкалы на отклонение фазы основной гармоники кинетической энергии КШМ при $\alpha = 1$ и регулирование состава смеси фазовым регулятором ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка – около 50 %)

Fig. 6. The influence of the displacement of the angular scale on the phase deviation of the fundamental harmonic of the kinetic energy of the crank mechanism at $\alpha = 1$ and regulation of the mixture composition with a phase regulator ($n = 2000 \text{ min}^{-1}$, load of about 50 %)

На фазу гармоник кинетической энергии КШМ высших порядков смещение угловой шкалы действует подобно тому, как оно действует на фазу основной гармоники – сдвигает по осям Θ_3 и Ψ_{T_k} (где k – порядок гармоники). Однако величина смещения по оси Ψ_{T_k} кратна порядку гармоники и равняется $\Delta\phi_0 k/k_{\text{осн}}$, где $k_{\text{осн}}$ – порядок основной гармоники (в данном случае $k_{\text{осн}} = 1/2$). Вследствие этого область пересечения кривых зависимости $\Psi_{T_k} = f(\Theta_3)$, построенных для разных значений смещения шкалы, будет лежать вблизи УОЗ, при котором производная $\partial\Psi_{T_k}/\partial\Theta_3$ указанной зависимости без смещения равна $k/k_{\text{осн}}$. Таким образом, у каждой гармоники будет свой нивелирующий действие смещения шкалы УОЗ. На рассматриваемом режиме работы двигателя и при стехиометрическом составе смеси для k от 1 до $2^{1/2}$ эти углы лежат в пределах от $-7,5$ до $4,5^\circ$ ПКВ. Аналогичный УОЗ основной гармоники равен 14° ПКВ. Из этого следует, что там, где имеет место нивелирование смещения шкалы для основной гармоники, фазы гармоник высших по-

рядков отличаются от своих значений, полученных при номинальном положении шкалы. И это отличие пропорционально величине смещения. Данное свойство создает предпосылки для оценки смещения шкалы в области нивелирования действия этого смещения на фазу основной гармоники.

Возможность определения смещения шкалы по гармоникам высших порядков в вышеуказанной области по УОЗ определяется характером зависимости $\Psi_{Tk} = f(\Theta_3)$. Как показали эксперименты, наиболее подходящим режимом для этого является режим холостого хода при минимальной частоте вращения, где в рассматриваемой области по УОЗ приведенное по номеру гармоники отклонение фаз гармоник кинетической энергии КШМ высших порядков близко к смещению шкалы. Результаты экспериментов на указанном режиме для смещения шкалы, равного $-3, 0$ и 3° ПКВ, приве-

дены в табл. 1 и 2. Данные табл. 1 получены при УОЗ, нивелирующем действие смещения шкалы на фазу основной гармоники, равно на этом режиме 16° ПКВ. В табл. 2 вошли данные, снятые при существенном отклонении УОЗ от этого значения.

В ходе экспериментов состав смеси поддерживался фазовым регулятором на уровне $\alpha = 1$. Результат работы регулятора – коэффициент k_p коррекции циклового расхода топлива. При $\Theta_3 = 16^\circ$ ПКВ значение данного коэффициента оказалось практически одним и тем же для всех значений смещения шкалы. И относительное отклонение $\delta\alpha$ коэффициента избытка воздуха при наличии смещения также составляет незначительную величину – около 1% в сторону обогащения смеси. Увеличение УОЗ до 30° ПКВ приводит к появлению существенной разницы в k_p и $\delta\alpha$, так как в этом случае смещение шкалы нарушает корреля-

Таблица 1

Влияние смещения угловой шкалы на параметры регулирования состава смеси фазовым регулятором и фазу первых пяти гармоник кинетической энергии КШМ на режиме холостого хода при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и угле опережения зажигания, нивелирующем действие смещения шкалы на фазу основной гармоники ($\Theta_3 = 16^\circ$ ПКВ)

Table 1. The influence of the displacement of the angular scale on the parameters of the mixture composition control by the phase regulator and the phase of the first five harmonics of the kinetic energy of the crank mechanism at idle speed $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ and the ignition timing, which neutralizes the effect of the scale shift on the phase of the fundamental harmonic ($\Theta_3 = 16^\circ$ CKP)

$\Delta\varphi_0, ^\circ\text{ПКВ}$	α	$\delta\alpha, \%$	k_p	$\Psi_{Tk}, ^\circ\text{ПКВ, для } k$					$\Delta\Psi'_{Tk}, ^\circ\text{ПКВ, для } k$					$\Delta\Psi'_{T\text{ср}}, ^\circ\text{ПКВ}$
				$\frac{1}{2}$	1	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	
-3	1,000	-0,4	1,084	306,22	682,11	214,10	497,11	109,72	-0,06	-0,69	-2,94	-2,70	-2,72	-2,79
0	1,004	–	1,080	306,28	683,48	222,91	507,93	123,31	–	–	–	–	–	–
3	0,992	-1,2	1,081	306,22	684,61	231,36	518,62	136,97	-0,06	0,56	2,82	2,67	2,73	2,74

Таблица 2

Влияние смещения угловой шкалы на параметры регулирования состава смеси фазовым регулятором и фазу первых пяти гармоник кинетической энергии КШМ на режиме холостого хода при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $\Theta_3 = 30^\circ$ ПКВ

Table 2. The influence of the displacement of the angular scale on the parameters of the mixture composition control by the phase regulator and the phase of the first five harmonics of the kinetic energy of the crank mechanism at idle speed $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ and $\Theta_3 = 30^\circ$ CKP

$\Delta\varphi_0, ^\circ\text{ПКВ}$	α	$\delta\alpha, \%$	k_p	$\Psi_{Tk}, ^\circ\text{ПКВ, для } k$					$\Delta\Psi'_{Tk}, ^\circ\text{ПКВ, для } k$					$\Delta\Psi'_{T\text{ср}}, ^\circ\text{ПКВ}$
				$\frac{1}{2}$	1	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	
-3	0,888	-9,8	1,142	316,39	698,02	206,48	504,83	117,61	-0,16	-0,72	-3,70	-2,74	-2,90	-3,11
0	0,984	–	1,053	316,55	699,46	217,57	515,77	132,13	–	–	–	–	–	–
3	1,061	7,8	0,998	316,62	699,92	229,70	528,07	147,91	0,07	0,23	4,04	3,07	3,15	3,42

цию между фазой основной гармоники кинетической энергии КШМ и составом смеси. Это видно по приведенным в табл. 2 значениям $\Psi_{T\frac{1}{2}}$ и α : поддерживаемое регулятором значение фазы практически не изменяется, а отклонение состава смеси достигает 10 %. Таким образом, можно заключить о верности сделанного выше вывода о существовании УОЗ, нивелирующего действие смещения угловой шкалы.

Оценка $\Delta\varphi'_0$ величины смещения шкалы на рассматриваемом режиме и $\Theta_3 = 16^\circ$ ПКВ может быть сделана по приведенному отклонению $\Delta\Psi'_{Tk}$ фазы гармоники кинетической энергии КШМ (по гармоникам выше 1-го порядка):

$$\Delta\varphi'_0 = \Delta\Psi'_{Tk} = \frac{\Psi_{Tk} - \Psi_{Tk0}}{k/k_{\text{осн}}},$$

где Ψ_{Tk0} – значение фазы k -й гармоники кинетической энергии КШМ при отсутствии смещения шкалы; $k > 1$. Гармоника порядка $\frac{1}{2}$ исключается, так как ее фаза поддерживается регулятором, а отклонение фазы 1-й гармоники незначительно вследствие близкого к 16° ПКВ положения нивелирующего смещение шкалы УОЗ, равного для этой гармоники на рассматриваемом режиме 7° ПКВ.

Поскольку на практике наблюдаемыми могут быть гармоники сравнительно невысоких порядков, то в данной работе оценка смещения выполнялась по гармоникам порядка $1\frac{1}{2}$... $2\frac{1}{2}$. Для этих гармоник получаются близкие результаты (см. табл. 1), поэтому по ним можно вычислить среднее приведенное отклонение $\Delta\Psi'_{\text{ср}}$ фазы кинетической энергии КШМ, которое может быть принято в качестве усредненной оценки смещения угловой шкалы. Как видно из представленных в табл. 1 результатов, усредненная оценка смещения занижена приблизительно на 7...9 %. Для снижения ошибки можно рекомендовать выполнять оценку смещения в несколько итераций, корректируя положение угловой шкалы по результатам очередной итерации.

При удалении от нивелирующего действие смещения УОЗ гармоники порядка $1\frac{1}{2}$... $2\frac{1}{2}$ также позволяют получить близкую к действительности оценку смещения шкалы (см. табл. 2), однако состав смеси при этом значительно отличается от заданного, и сами значения отклонения фазы имеют больший разброс по гармоникам. Если же эти результаты усреднить вместе с отклонением фазы для тех же гармоник при $\Theta_3 = 16^\circ$ ПКВ, то оценка смеще-

ния составит $-2,95$ и $3,08^\circ$ ПКВ для его заданного значения в -3 и 3° ПКВ соответственно. Такое объединение результатов снижает погрешность оценки до 3 %.

Выводы

Одноцилиндровый двигатель с принудительным воспламенением обладает свойствами, позволяющими в условиях эксплуатации оценить смещение угловой шкалы и свести на нет его влияние на регулирование состава смеси фазовым регулятором.

Смещение шкалы может быть определено различными способами: по отклонению фазы гармоники кинетической энергии КШМ любого наблюдаемого порядка (как минимум, первых пяти) в экстремуме зависимости данной фазы от УОЗ при прочих равных условиях; по сдвигу производной по УОЗ указанной зависимости; по сдвигу зависимости разности данной фазы и УОЗ от последнего; по отклонению фазы гармоник кинетической энергии КШМ высших порядков при УОЗ, нивелирующем действие смещения шкалы на фазу основной гармоники кинетической энергии КШМ. Выбор того или иного способа определяется точностью получаемой оценки в зависимости от условий работы двигателя.

Уточнение действительного положения коленчатого вала за счет оценки смещения шкалы предложенными способами позволит сохранить необходимую точность управления УОЗ при снижении требований к допускам на установку датчика положения коленчатого вала и диска синхронизации на одноцилиндровых двигателях практически любого назначения, особенно при наличии лямбда-зонда.

Литература

1. Ravenhill P., et al. Low cost electronic fuel injection for motorcycles and utility engines // SAE Paper 2009-32-0149.
2. Service manual. EX13, 17, 21, 27, SP170, SP210, EX21 electronic fuel injection engines. Robin America, Inc., 2009. URL: <https://www.subarupower.com/media/manuals/129036362809063750.pdf> (дата обращения: 14.08.2021).
3. Takano Y., et al. Development of intake air pressure sensorless fuel injection system for small motorcycles // SAE Paper 2011-32-0564.
4. Nishida K., et al. Estimation of indicated mean effective pressure using crankshaft angular velocity variation // SAE Paper 2011-32-0510.

5. Seuling S., et al. Model based engine speed evaluation for single-cylinder engine control // SAE Paper 2012-32-0044.
6. Абрамов П.В., Свирин О.А., Сухов С.П., Кочетков А.А. Оценка наполнения и состава смеси в одноцилиндровом двигателе с принудительным воспламенением по внутрицикловой вариации угловой скорости коленчатого вала // Фундаментальные проблемы совершенствования поршневых двигателей: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Владим. гос. ун-т. Владимир, 2010. С. 79–86.
7. Абрамов П.В. Фазовый регулятор состава смеси для одноцилиндрового двигателя // Двигателестроение. 2021. № 2. С. 26–30.
3. Takano Y., et al. Development of intake air pressure sensorless fuel injection system for small motorcycles // SAE Paper 2011-32-0564.
4. Nishida K., et al. Estimation of indicated mean effective pressure using crankshaft angular velocity variation // SAE Paper 2011-32-0510.
5. Seuling S., et al. Model based engine speed evaluation for single-cylinder engine control // SAE Paper 2012-32-0044.
6. Abramov P.V., Svirin O.A., Sukhov S.P., Kochetkov A.A. Estimation of the filling and composition of the mixture in a single-cylinder engine with forced ignition from the intracycle variation of the angular velocity of the crankshaft. Fundamental'nyye problemy sovershenstvovaniya porshnevykh dvigateley: Materialy XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Fundamental problems of improving piston engines: Proceedings of the XII International scientific-practical conference]. Vladim. gos. un-t. Vladimir, 2010, pp. 79–86 (in Russ.).
7. Abramov P.V. Phase regulator of the mixture ratio for a single-cylinder engine. Dvigatelistroyeniye. 2021. No 2, pp. 26–30 (in Russ.).

References

1. Ravenhill P., et al. Low cost electronic fuel injection for motorcycles and utility engines // SAE Paper 2009-32-0149.
2. Service manual. EX13, 17, 21, 27, SP170, SP210, EX21 electronic fuel injection engines. Robin America, Inc., 2009. URL: <https://www.subarupower.com/media/manuals/129036362809063750.pdf> (accessed: 14.08.2021).