

УДК 621.436

Р.А. ВАРБАНЕЦ¹, А.И. МОРОЗОВ², Д.Ю. МИХАЙЛОВ³¹ *Одесский национальный морской университет, Украина*² *Одесская национальная академия связи, Украина*³ *Multimedia Marine Group corp., Украина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗЫ НАЧАЛА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ЗАДАЧАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Рассмотрен вопрос корректной синхронизации данных, как один из наиболее важных этапов задачи математического моделирования рабочего процесса ДВС. Исследованы факторы, влияющие на точность синхронизации рабочего процесса. Произведена оценка влияния погрешности определения фазы начала сгорания на точность синхронизации. Алгоритмическая синхронизация данных мониторинга рабочего процесса основана на решении уравнения $dp/d\phi = 0$. Для решения этого уравнения предложен метод определения фазы начала сгорания в цилиндре. Показана допустимость при практическом индицировании использования 2-й производной диаграммы $p(\phi)$ для определения фазы начала сгорания топлива в цилиндре.

рабочий процесс, мониторинг, синхронизация данных, фаза начала сгорания, параметры рабочего процесса, индикаторная мощность, верхняя мертвая точка, диагностирование

Введение

Математическое моделирование рабочего процесса является одной из главных составляющих общей задачи мониторинга и технической диагностики двигателей внутреннего сгорания в процессе эксплуатации. В задаче математического моделирования рабочего процесса одним из наиболее важных этапов является корректная синхронизация данных. Под процедурой синхронизации данных рабочего процесса подразумевается перевод данных, записанных в виде равномерного временного ряда, в зависимости от угла поворота коленчатого вала:

$$P(t) \rightarrow P(\phi); \quad T(t) \rightarrow T(\phi).$$

Основным и первым шагом синхронизации является решение задачи как можно более точного определения положения верхней мертвой точки (ВМТ) поршня. Анализ погрешности расчета основных параметров рабочего процесса, в зависимости от точности оценки ВМТ, дан в работах многих отечественных и зарубежных авторов.

Так, например, в работе [1], посвященной экспе-

риментальной проверке точности алгоритмического метода расчета ВМТ, показано, что на среднеоборотных (СОД) и высокооборотных (ВОД) дизелях погрешность определения ВМТ в 1° поворота коленчатого вала (ПКВ) приводит к 10% погрешности определения среднего индикаторного давления и 25% погрешности расчетной оценки тепловыделения на такте расширения.

В статье [2] приведена зависимость погрешности среднего эффективного давления в процентах от погрешности определения ВМТ в градусах ПКВ. Автор утверждает, что каждый градус погрешности определения ВМТ приводит к 9% погрешности в расчете среднего эффективного давления и мощности цилиндра:

$$\frac{\Delta \text{ИМЕР}[\%]}{\Delta \text{ВМТ}[\text{°ПКВ}]} \cong 9.$$

В работах [1 – 4], посвященных методам оценки ВМТ, указывается на существенное влияние точности оценки ВМТ на расчет основных параметров рабочего процесса и, в первую очередь, мощности цилиндра.

В статье [5] предложен алгоритмический метод

синхронизации (рис. 1), основанный на решении уравнения

$$\frac{dP}{d\phi_{\text{ВМТ}}} \cong 0, \quad (1)$$

где P – давление газов в цилиндре в случае отключения подачи топлива; $\phi_{\text{ВМТ}}$ – искомый угол верхней мертвой точки цилиндра.

Общая формула уравнения (1) получена на основании зависимости:

$$P = P_a \varepsilon^{n1} = P_a \left(\frac{V_a}{V_\phi} \right)^{n1},$$

где P_a – давление в цилиндре в начале сжатия;

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_\phi} - \text{расчетная степень сжатия на } \phi \text{ угле}$$

поворота КВ;

V_a – объем цилиндра в начале сжатия;

$V_\phi = V(\phi)$ – текущий объем цилиндра на ϕ -м угле поворота КВ;

$n1$ – показатель политропы сжатия в цилиндре.

Расчетная формула уравнения (1) имеет вид:

$$\frac{dP_{\text{comp}}}{d\phi} = -P_a V_a^{n1} n1 \frac{1}{V_\phi^{n1+1}} \times 0,5 V_S \times \left(\sin \phi + \frac{\lambda_{III} \sin \phi \cos \phi}{\sqrt{1 - \lambda_{III}^2 \sin^2 \phi}} \right), \quad (2)$$

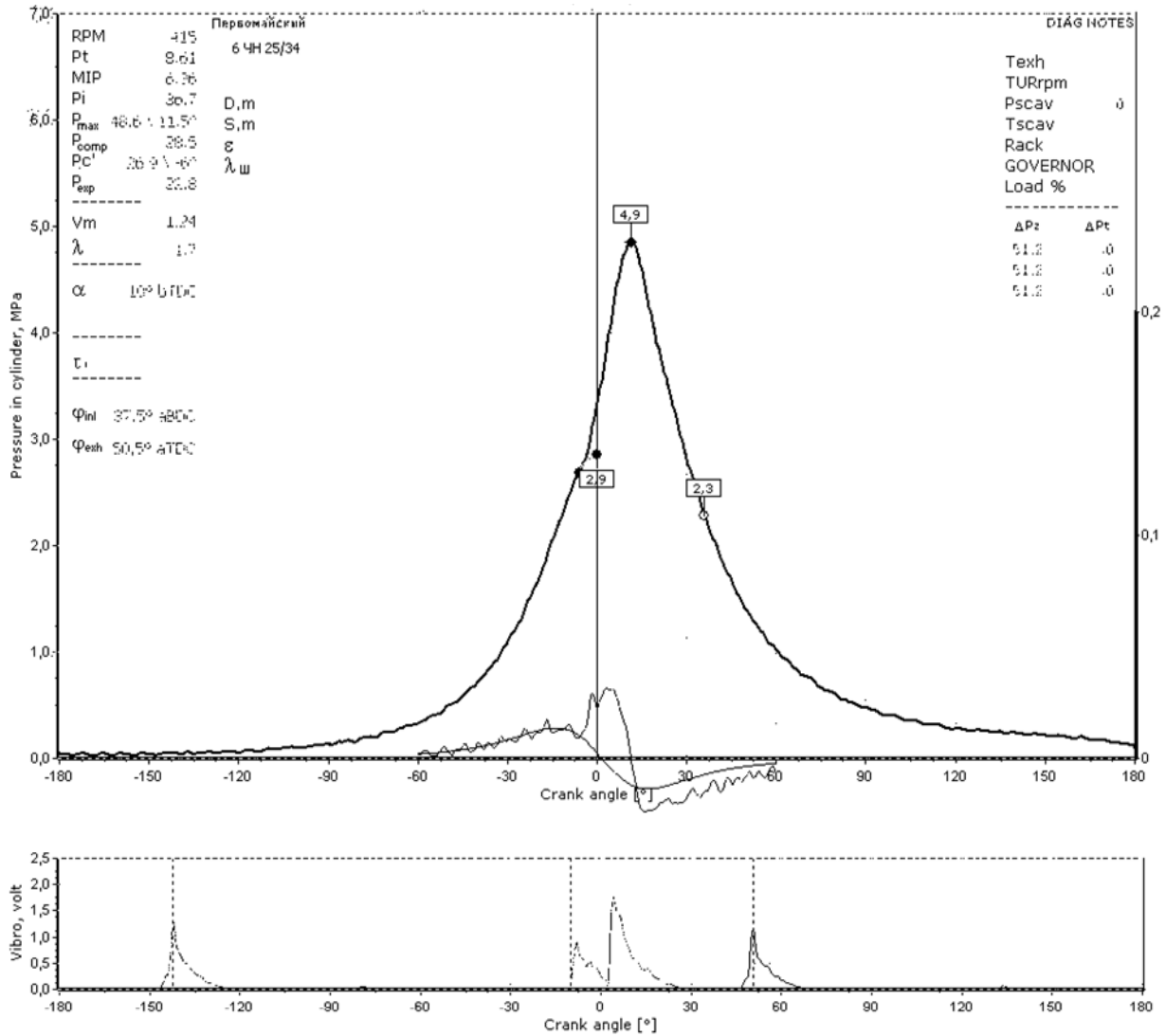


Рис. 1. Диаграмма $P(\phi)$, $dP/d\phi$ и вибродиаграммы топливной аппаратуры и механизма газораспределения (пунктиром показаны фазы закрытия клапанов и подъема иглы форсунки)

где $\lambda_{III} = R_{KP} / L_{III}$ – отношение шатуна, равное частному радиуса кривошипа и длины шатуна.

Проблема, решению которой посвящена данная статья, состоит в том, что уравнение (2) решается не на всей области значений $P(\phi)$, а только на той, где еще отсутствует воспламенение топлива. На рис. 1 эта область показана участком модели $dP/d\phi$, совпадающим с участком численного дифференциро-

вания $\Delta P/\Delta\phi$ (от -60° до -6° ПКВ).

В том случае, если в цилиндре отсутствует подача топлива и происходит чистое сжатие-расширение воздушного заряда, оценка положения ВМТ может быть произведена с инженерной точностью по выражению $\phi_{ВМТ} = \phi P_{max}$, либо рассчитана с помощью (2) на всей области значений.

Такая задача решается относительно легко и

Таблица 1

Влияние фазовой погрешности определения $\phi P_c'$ на расчет основных параметров рабочего процесса

<p>RPM 415 Pt 8.61 MIP 6.36 Pi 36.7 P_{max} 48.6 \ 11.5° P_{comp} 38.5 P_{c'} 36.9 \ -6° P_{exp} 22.8</p> <p>-----</p> <p>V_m 1.24 λ 1.7</p> <p>-----</p> <p>α 10° bTDC</p> <p>-----</p> <p>τ_i</p> <p>-----</p> <p>φ_{int} 37,5° aBDC φ_{exh} 50,5° aTDC</p>	<p>RPM 415 Pt 8.62 MIP 4.37 Pi 25.2 P_{max} 48.6 \ 6.5° P_{comp} 33.7 P_{c'} 31.4 \ -6.5° P_{exp} 19.2</p> <p>-----</p> <p>V_m 1.32 λ 1.44</p> <p>-----</p> <p>α 15,5° bTDC</p> <p>-----</p> <p>τ_i</p> <p>-----</p> <p>φ_{int} 32,5° aBDC φ_{exh} 45,5° aTDC</p>	<p>RPM 415 Pt 8.62 MIP 3.86 Pi 19.4 P_{max} 48.6 \ 4° P_{comp} 36.8 P_{c'} 34.2 \ -7° P_{exp} 17.5</p> <p>-----</p> <p>V_m 1.3 λ 1.32</p> <p>-----</p> <p>α 18° bTDC</p> <p>-----</p> <p>τ_i</p> <p>-----</p> <p>φ_{int} 30° aBDC φ_{exh} 43° aTDC</p>	<p>RPM 415 Pt 8.63 MIP 1.82 Pi 10.5 P_{max} 48.6 \ 0° P_{comp} 42.2 P_{c'} 38.9 \ -8° P_{exp} 15.3</p> <p>-----</p> <p>V_m 1.21 λ 1.15</p> <p>-----</p> <p>α 21,5° bTDC</p> <p>-----</p> <p>τ_i</p> <p>-----</p> <p>φ_{int} 26,5° aBDC φ_{exh} 39° aTDC</p>
<p>a ΔφP_{c'} = 0° deg</p>	<p>b ΔφP_{c'} = 0,5° deg</p>	<p>c ΔφP_{c'} = 1,0° deg</p>	<p>d ΔφP_{c'} = 2,0° deg</p>

применяется для корректировки аппаратных методов определения ВМТ в некоторых системах мониторинга рабочего процесса ДВС [6, 7]. Проблема состоит в том, что задача корректного определения ВМТ и последующей синхронизации актуальна именно на рабочем цилиндре, когда происходит впрыск топлива и его воспламенение на определенной фазе поворота КВ. В этом случае уравнение (2) решается на малом сегменте значений $P(\phi)$: от начала сжатия до момента начала воспламенения топлива.

Фазу начала сжатия можно определить с помощью методов, указанных в [8]. Принимаем ее равной углу закрытия впускного клапана после нижней мертвой точки (НМТ). Момент начала воспламенения топлива необходимо оценить с максимальной возможной точностью по временной диаграмме $P(t)$. Поскольку задача корректного определения фазы начала сгорания, является составной частью общей задачи синхронизации и актуальна для метода базирующегося на уравнении (1), ее решению не уделялось должного внимания в известной научной литературе.

Целью данной статьи является анализ метода определения фазы начала сгорания топлива в цилиндре ДВС с помощью производных (до 4-го порядка) исходной выборки $P(t)$.

Статья подготовлена в процессе выполнения научно-исследовательской работы на тему: «Разработка теоретической базы системы мониторинга рабочего процесса судовых дизелей» (номер государственной регистрации №0106U001268).

На рис. 1 показаны индикаторная диаграмма и вибродиаграммы топливной аппаратуры (ТА) и механизма газораспределения (МГР) дизеля 6ЧН25/34. В данном случае абсолютная фазовая погрешность синхронизации не превышает $0,25^\circ$ ПКВ. Характерными признаками столь малой погрешности синхронизации по методу [5] является то, что модель $dP/d\phi$ не «захватывает» точки участка кривой $P(\phi)$,

на которых происходит сгорание топлива. На верхней части графика видно, что модель $dP/d\phi$ и реальная кривая $\Delta P/\Delta\phi$ расходятся после начала сгорания.

Анализ ситуаций, при которых происходит неточное определение фазы начала сгорания, представлен в табл. 1. При увеличении ошибки определения фазы начала сгорания видно, что построение модели $dP/d\phi$ начинает базироваться на «лишних» точках и в конечном итоге происходит ее искажение, как показано для случая $\Delta\phi_{Pc'} = 2,0^\circ$ ПКВ.

Погрешность в определении фазы начала сгорания приводит к ошибке синхронизации (рис. 2), причем на малых углах отклонения $\phi_{Pc'}$ ошибка синхронизации на порядок больше.

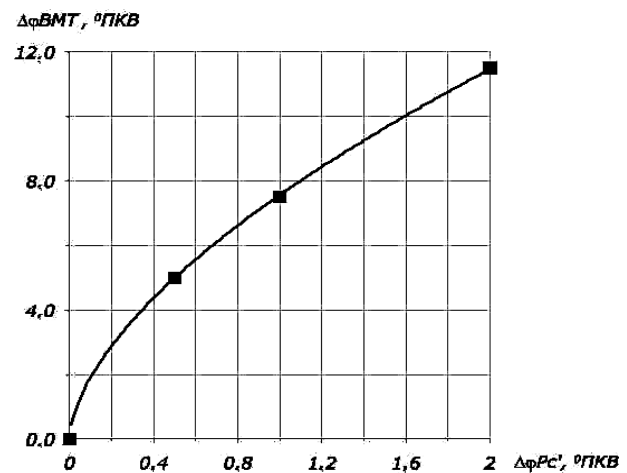


Рис. 2. Влияние фазовой погрешности определения $\phi_{Pc'}$ на ошибку синхронизации

Показанная на рис. 2 зависимость описывается степенной функцией:

$$\Delta\phi_{\text{ВМТ}} = A \times \Delta\phi_{Pc'}^B,$$

где значения коэффициентов A и B для исходных данных, записанных на разных дизелях СОД равны:

$$A=7 \div 10; \quad B=0,6 \div 1.$$

Указанные значения коэффициентов степенной модели характеризуют почти десятикратную зависимость погрешности расчетной синхронизации от ошибки фазы начала сгорания.

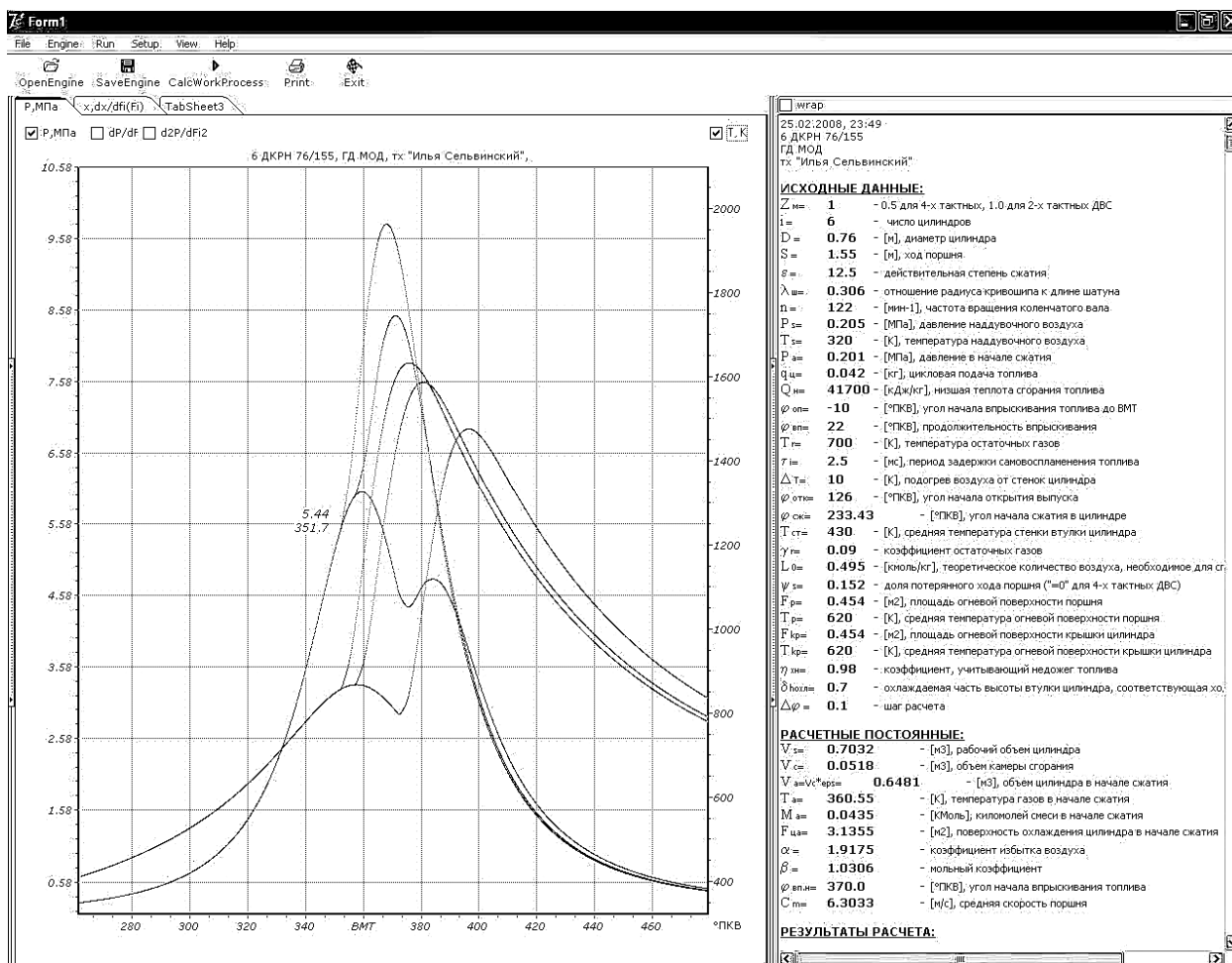


Рис. 3. Интерфейс программы расчета рабочего процесса с учетом динамики тепловыделения по методу В.С. Семенова и В.И. Квятковского

Вследствие ошибки синхронизации происходит существенное искажение результатов расчета параметров рабочего процесса (рис. 4). Так, например, расчетное среднее индикаторное давление и индикаторная мощность цилиндра практически линейно изменяются (повышаются в данном случае). Расчетное значение давления в конце сжатия увеличивается (рис. 4, с). Контрольная точка давления на линии расширения (36° ПКВ за ВМТ) – уменьшается так же по линейному закону (рис. 4, с). Расчетное значение степени повышения давления λ линейно уменьшается, а значение скорости повышения давления V_m на малых углах $\Delta\phi_{Pc'}$ увеличивается, а затем уменьшается (рис. 4, б). Расчетное значение угла опережения впрыска топлива α увеличивается линейно в соответствии с ошибкой синхронизации (рис. 4, а).

В связи с показанным выше существенным влиянием ошибки в определении фазы начала сгорания топлива $\phi_{Pc'}$ на точность синхронизации и, в конечном итоге, на расчетные параметры рабочего процесса, необходимо найти метод определения $\phi_{Pc'}$ с минимально возможной погрешностью.

Для анализа метода определения фазы начала сгорания использовались данные, полученные путем математического моделирования зависимости давления $P(\phi)$ в цилиндре ДВС (рис. 3). Использовалась разработанная на кафедре «Судовые энергетические установки» ОНМУ модель рабочего процесса в цилиндре СДВС, базирующаяся на 1-м законе термодинамики и использующая трехфазную модель тепловыделения В.С. Семенова – В.И. Квятковского для расчета процесса сгорания. На рис. 3

показано окно программы с выводом расчетных диаграмм $p(\phi)$, $t(\phi)$ рабочего процесса дизеля МОД, для углов опережения впрыска топлива $\alpha = +10^\circ$, $+5^\circ$ и -10° ПКВ. В правом окне рис. 3 приведены исходные данные для расчета рабочего процесса при $\alpha = -10^\circ$ ПКВ. Результаты расчета в виде зависимости $P(\phi)$ с шагом $0,5^\circ$ ПКВ были экспортированы во внешний файл для дальнейшей обработки.

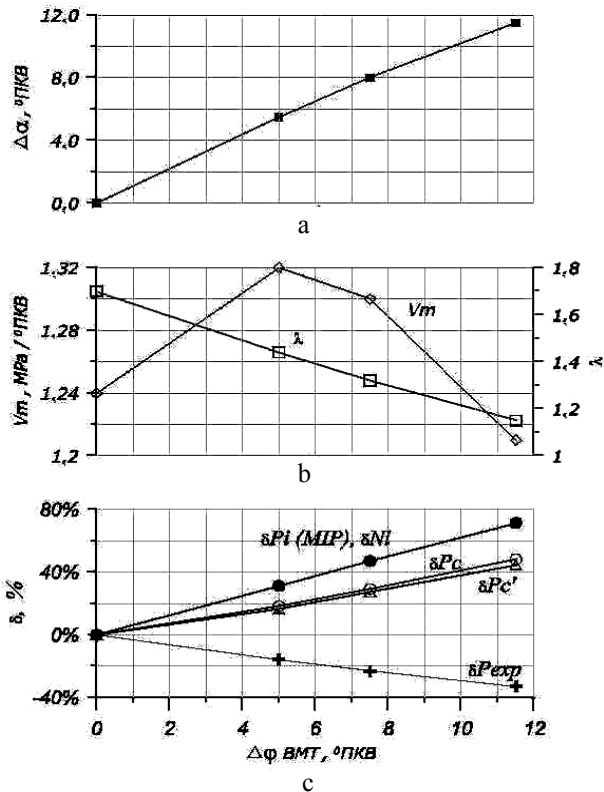


Рис. 4. Влияние фазовой погрешности $\phi P_c'$ на ошибку синхронизации и определения основных параметров рабочего процесса

Исходя из того, что на исходных диаграммах $P(\phi)$ момент начала самовоспламенения слабо выражен для большинства СДВС с ранними углами опережения подачи топлива до ВМТ, анализировать исходную выборку не представляется возможным.

Суть анализируемого метода заключается в том, что каждый раз отыскивается угол, соответствующий максимуму m -й производной, который с ростом порядка дифференцирования приближается к искомому $\phi P_c'$, точно известному для модели рассматриваемого процесса.

Производные $P(\phi)$ – дискретной функции с одинаковыми интервалами между отсчетами h определялись методом численного дифференцирования соответствующего интерполяционного полинома Ньютона [9]. Каждое значение производной для любого аргумента $P(\phi)$ вычислялось в 4-х равноотстоящих точках (две справа и две слева от искомой точки) по формулам:

$$y'_0 = \frac{1}{12h}(y_{-2} - 8y_{-1} + 8y_1 + y_2);$$

$$y''_0 = \frac{1}{12h^2}(-y_{-2} + 16y_{-1} - 30y_0 + 16y_1 - y_2);$$

$$y'''_0 = \frac{1}{2h^3}(-y_{-2} + 2y_{-1} - 2y_1 + y_2);$$

$$y^4_0 = [y'''_0]'$$

На рис. 5, 6 показаны исходные диаграммы $P(\phi)$ и диаграммы их производных 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядков, для углов опережения подачи топлива 10° до ВМТ (рис. 5) и 10° за ВМТ (рис. 6).

Фазы начала сгорания топлива определялись как координаты максимумов производных (во всех случаях кроме первой производной):

$$\phi P_c' = \phi_{\max} \frac{d^m P}{d\phi^m}, \text{ где } m=2;3;4.$$

Координата максимума первой производной $dP/d\phi$ может находиться на участке сжатия (рис. 6) или на участке начала сгорания (рис. 5) в зависимости от того, где скорость изменения давления больше. Разумеется, оценку положения фазы начала сгорания, как точки «перегиба» или границы между процессами сжатия и сгорания с помощью $dP/d\phi$ определить невозможно.

Важный для практической эксплуатации параметр $V_m = \max(dP/d\phi)$ определяется при каждом индицировании двигателя и характеризует механическую нагрузку цилиндра.

На рис. 7 показана относительная ошибка определения угла $\phi P_c'$ в зависимости от порядка производной m , вычисленная по формуле:

$$\delta = \left| \frac{\phi_{Pc'} - \phi_{max} \frac{d^m P}{d\phi^m}}{\phi_{Pc'}} \right|$$

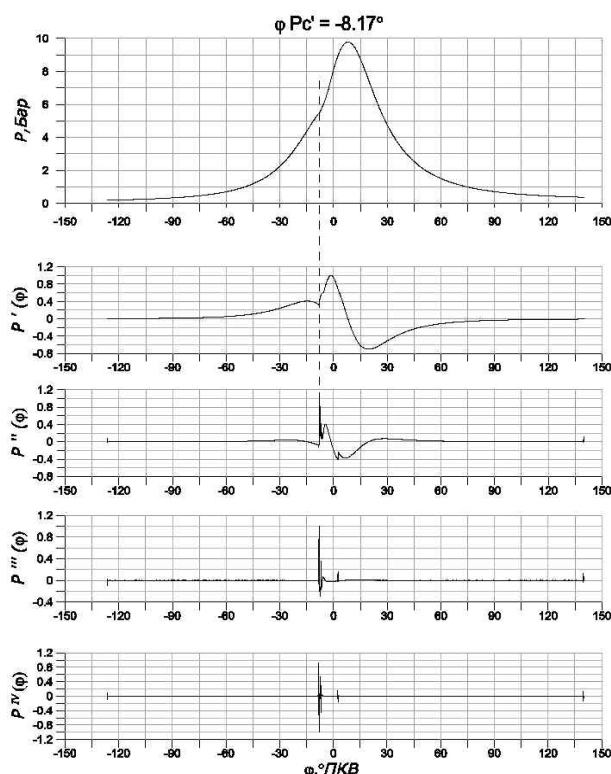


Рис. 5. Определение фазы начала сгорания топлива (угол опережения впрыска до ВМТ)

В случае с поздним (за ВМТ) углом опережения подачи топлива (рис. 7, b) относительная погрешность меньше, чем в случае с ранним углом (рис. 7, a).

Анализ относительной погрешности $\phi_{Pc'}$ показывает, что с увеличением порядка производной относительная погрешность уменьшается. Для производных 3-го и 4-го порядков абсолютная погрешность определения $\phi_{Pc'}$ уже в большинстве случаев совпадает с шагом дискретизации данных.

Выводы и перспективы исследований

1. При использовании расчетных методов синхронизации данных первичной задачей является разделение процессов сжатия воздушного заряда в цилиндре и сгорания топлива.

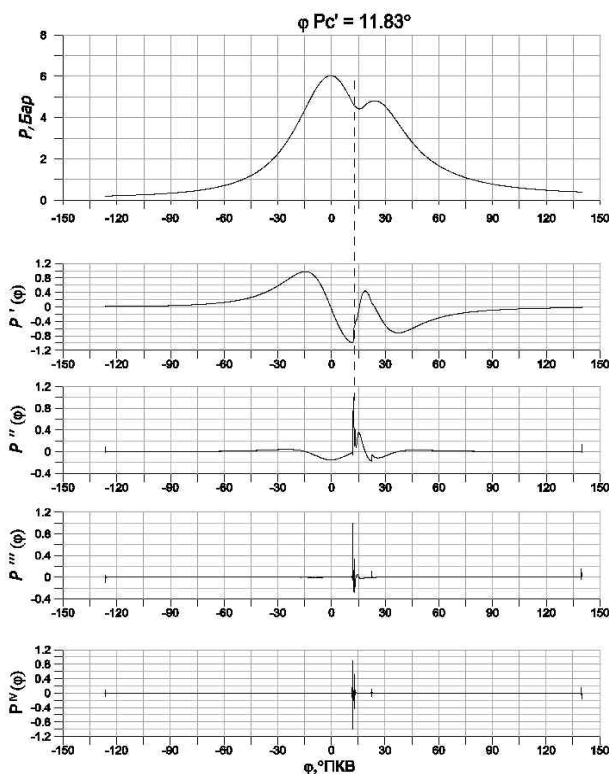


Рис. 6. Определение фазы начала сгорания топлива (впрыск топлива после ВМТ)

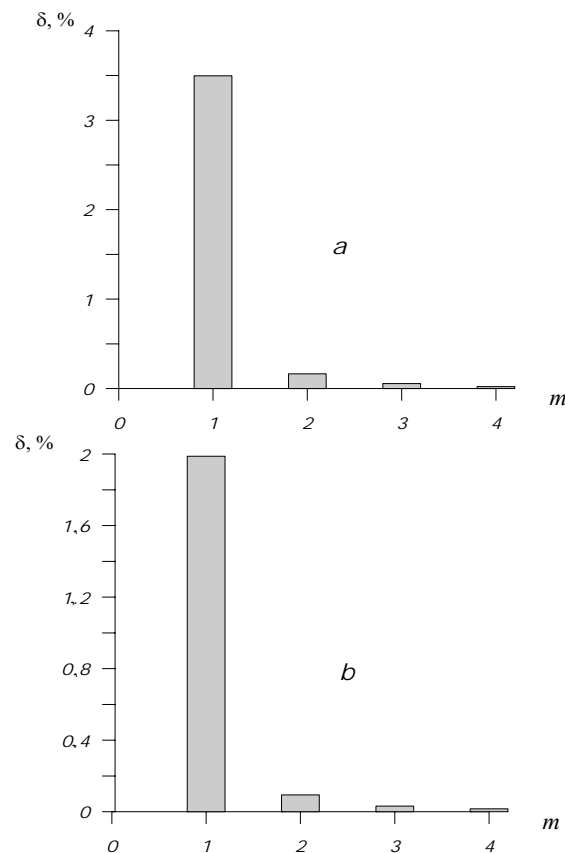


Рис. 7. Относительная ошибка определения угла $\phi_{Pc'}$ в зависимости от степени производной m функции $P(\phi)$

2. Ошибка в определении фазы начала сгорания существенным образом влияет на погрешность синхронизации. Отношение погрешностей

$$\Delta \text{PC}' / \Delta \text{ВМТ} = 6 \div 10.$$

3. Погрешность синхронизации, выраженная в погрешности определения координаты ВМТ, приводит к существенной ошибке в расчете среднего индикаторного давления и мощности цилиндра (до 10% на один градус).

4. Определение фазы начала сгорания в рабочем цилиндре возможно с помощью расчета координат максимумов производных, начиная с производной 2-го порядка.

5. Для «гладких» без шумов исходных данных с увеличением порядка производной точность определения фазы начала сгорания увеличивается.

6. Во время мониторинга реального рабочего процесса, с учетом шумов преобразования и дискретизации, применение производной выше 2-го порядка нецелесообразно, поскольку с увеличением n уменьшение относительной погрешности незначительно (рис. 7). Кроме того, при численном дифференцировании для производных старших порядков существенно возрастает влияние шумов.

7. Дальнейшие исследования необходимо провести на реальных данных мониторинга рабочего процесса в цилиндрах ДВС СОД и МОД. Для минимизации шумов в исходных данных целесообразно воспользоваться методами цифровой фильтрации на базе преобразования Фурье либо альтернативными.

Заключение

Повышение точности алгоритмических методов синхронизации данных позволит улучшить качество мониторинга рабочего процесса ДВС во время эксплуатации и повысить достоверность получаемой таким образом диагностической информации.

Литература

1. Emiliano Pipitone. The Experimental Validation of a New Thermodynamic Method for TDC Determination // SAE 2008 World Congress 2008, Detroit, Michigan. – Document Number: 2007-24-0052. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sae.org/technical/papers/2007-24-0052> (22.01.2008).
2. Tazerout M., O. Le Corre, Stouffs P. Compression Ratio and Tdc Calibrations Using Temperature-Entropy Diagram // SAE 1999. – Document Number: 1999-01-3509 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.emn.fr/x-ener/lecorre/1999-01-1489.pdf> (25.03.2008).
3. Stas M.J. Thermodynamic Determination of T.D.C. in Piston Combustion Engines // SAE 2005 Paper No. 960610. – P. 759-768.
4. Brown W.L. Methods for Evaluating Requirements and Errors in Cylinder Pressure Measurement // SAE 1967 Paper No. 670008. – P. 50-77.
5. Варбанец Р.А. Синхронизация данных при индексировании СДВС // Збірник наукових праць. – Севастополь: Севастопольський ВМІ ім. П.С. Нахімова, 2005. – Вип. 2 (8). – С. 255-258.
6. Варбанец Р.А. Системы компьютерной диагностики судовых дизелей // Судостроительство. – 2004. – № 6. – С. 24-27.
7. TDC Sensor System for dynamic determination of the top dead centre position Type 2629B [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.kistler.com (22.01.2008).
8. Варбанец Р.А. Параметрическая диагностика дизелей SBV6M540 и Pegaso 9156 // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 8 (34). – С. 144-148.
9. Волков Е.А. Численные методы: Учебное пособие для вузов. – М.: Наука, гл.ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.

Поступила в редакцию 12.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Ханмамедов, Одесская национальная морская академия, Одесса.