

ПОЛУЧЕНИЕ ИНДИКАТОРНОЙ ДИАГРАММЫ ПРИ АСИНХРОННОМ ИЗМЕРЕНИИ СИГНАЛА ДАВЛЕНИЯ

В.А. Лашко, д.т.н., проф.; Тихоокеанский государственный университет
 А.Ю. Коньков, к.т.н., доц.;
 Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Для технической диагностики дизелей важное значение имеет получение индикаторной диаграммы. Рассмотрены два подхода к задаче бесфазовой синхронизации индикаторной диаграммы поршневого двигателя. Представлен сравнительный анализ методов и результаты опытной проверки предлагаемых решений для некоторых тепло-возных дизелей.

Экспериментальное получение индикаторной диаграммы (ИД) предполагает, как правило, измерение двух сигналов: сигнала давления и сигнала синхронизации (фазового сигнала). Синхронизирующий сигнал формируется с помощью различных датчиков. Наибольшее распространение в эксплуатации получили бесконтактные датчики на основе оптических и магнитных преобразователей. Разработчики диагностического оборудования стремятся максимально упростить процедуру подготовки двигателя к испытаниям, сократить ее продолжительность. Особенно актуальна проблема оперативности и универсальности применения переносных средств экспресс-диагностики на предприятиях, эксплуатирующих различные типы двигателей (локомотивные депо, пароходства и т. п.). На этапе подготовки двигателя к эксперименту применение отметчиков положения коленчатого вала в той или иной степени сопряжено с техническими трудностями. В таких условиях для потребителей диагностической продукции становятся привлекательными аппаратные комплексы, не требующие для получения ИД синхронизирующего сигнала. Наиболее известными примерами практической реализации бесфазовой синхронизации ИД являются системы мониторинга рабочего процесса дизеля семейства DEPAS [1, 2] и последние версии диагностического комплекса «Магистраль» [3]. К сожалению, в доступной научной литературе нам не удалось найти публикаций, раскрывающих суть применяемых авторами [1–3] решений. Именно это обстоятельство, с одной стороны, и безусловный интерес к проблеме, с другой, побудили нас к написанию настоящей статьи.

Рассмотрим теоретические предпосылки бесфазовой синхронизации ИД. Сигнал давления в цилиндрах двигателя является во многом детерминированным, хотя и содержит стохастическую составляющую. Детерминированность обусловлена термодинамикой рабочих процессов, а стохастичность, в первую очередь, — «шумами», сопровождающими любое физическое измерение. Кроме того, неизвестность режима и технического состояния двигателя в момент измерения давления вносят свою составляющую случайности в анализируемый сигнал, особенно на участке горения. Задачу бесфазовой синхронизации можно сформулировать как определение в асинхронном потоке данных давления характерных фазовых точек, позволяющих в конечном итоге определить положение ВМТ и «привязать» сигнал давления к шкале угла поворота коленчатого вала. Следует оговорить, что термин *асинхронный* в данном случае не совсем удачный, но подчеркивает асинхронность сигнала давления с углом поворота кривошипа. При этом ввод данных в память устройства измерения синхронизируется по времени.

Теоретически для решения поставленной задачи можно наметить две стратегии.

В первом случае задача сводится к аппроксимации участка сжатия ИД некоторой функцией известного вида (рис. 1). Рассмотрим поток дискретных данных с датчика давления, представив его вектором $p = \{p_1, p_2, \dots, p_{n-1}, p_n\}$, где n — количество полученных отсчетов давления. Будем

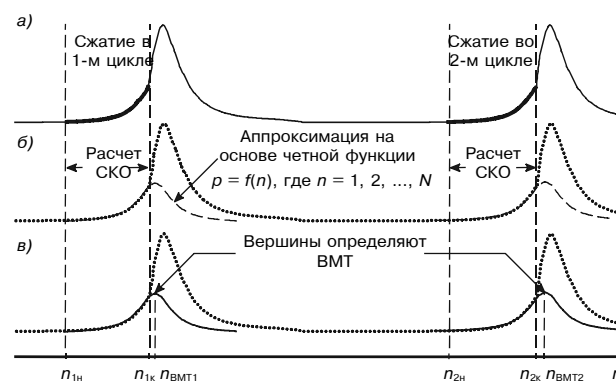


Рис. 1. Принцип синхронизации на основе аппроксимации участка сжатия

считать, что коленчатый вал вращается равномерно, а следовательно при равном периоде квантования сигнала по времени будет получен равный период квантования по углу кривошипа.

Алгоритм решения задачи может быть сведен к следующей последовательности.

✓ На ИД приблизительно выделяют участки сжатия — от начала повышения давления до начала видимого сгорания (участки $[n_{1н}, n_{1к}]$ и $[n_{2н}, n_{2к}]$ на рис. 1, а).

✓ Методом наименьших квадратов аппроксимируют участки сжатия функцией заданного вида (рис. 1, б). Среднее квадратичное отклонение (СКО) рассчитывают только в пределах выделенных участков. Процедуру выполняют последовательно для всех выделенных участков сжатия.

✓ Характерные точки функций (вершины симметрии), а точнее — найденные коэффициенты аппроксимирующей функции указывают на положение ВМТ рассматриваемого цикла ($n_{вмт1}$ и $n_{вмт2}$ на рис. 1, в).

Практическую реализацию предложенного алгоритма мы опробовали на функции вида

$$p = \frac{a}{k(n-b)^2 + 1}, \quad (1)$$

где p — величина давления в физических единицах или в кодах аналого-цифрового преобразователя; n — аргумент функции, представленный целочисленным рядом (иными словами n — порядковый номер данных в массиве давления); a , b , k — постоянные коэффициенты, определяемые в процедуре аппроксимации.

При построении эффективных алгоритмов решения задачи аппроксимации полезно представлять графический смысл искомых коэффициентов в уравнении (1). При $b = 0$ функция становится четной (график симметричный относительно оси ординат), а при $b > 0$ ось симметрии графика смещается вправо на величину b . Таким образом, после поиска величин всех коэффициентов, удовлетворяющих условию минимума СКО, значение b совпадает с порядковым номером данных в массиве, соответствующем ВМТ. Величина a (в выбранных единицах давления) может быть сопоставлена с давлением в конце сжатия при отсутствии горения. Коэффициент k определяет полноту графика вдоль оси абсцисс. Его оптимальное значение зависит преимущественно от частоты дискретизации, скоростного и нагрузочного режимов двигателя и, в меньшей степени, — от геометрии кривошипно-шатунного механизма.

Учитывая отмеченные особенности, границы варьирования коэффициентов a , k можно существенно сократить на основе экспериментальных данных.

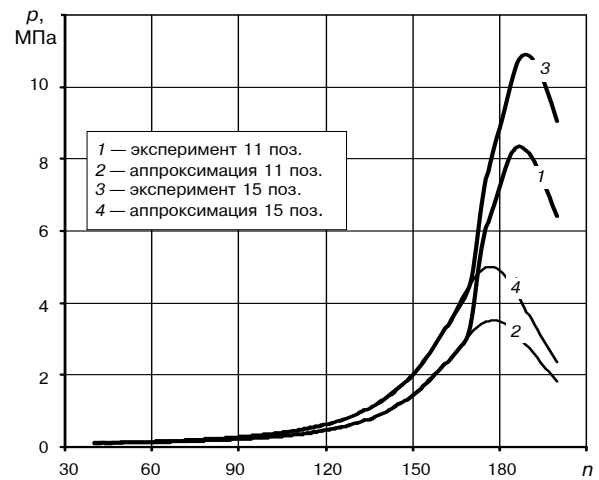


Рис. 2. Опытная проверка алгоритма синхронизации на основе аппроксимации участка сжатия:

1, 3 — экспериментальные кривые;
2, 4 — аппроксимирующие функции вида (1)

На рис. 2 представлены результаты опытной проверки рассмотренного алгоритма. Проверка выполнялась по данным индексирования тепловозного дизеля Д49 (16ЧН26/26), полученным при работе на 11-й и 15-й позициях контроллера машиниста (КМ) по тепловозной характеристике. Для возможности оценки точности найденных решений сигнал давления синхронизировался с углом кривошипа. Период дискретизации соответствовал углу 1° . Позиция ВМТ была предварительно определена по вершине диаграммы сжатие–расширение и на рис. 2 соответствует $n = 180$. Анализ полученных результатов показал, что функция вида (1) хорошо аппроксимирует опытную ИД на протяжении всего участка сжатия (в расчетах СКО принимался интервал $n = 40–168$). СКО составило $1,6 \cdot 10^{-3}$ МПа (для линий 1 и 2) и $3,8 \cdot 10^{-3}$ МПа (для линий 3 и 4). При этом были получены следующие значения коэффициентов: $a_{11} = 3,525$; $b_{11} = 178$; $k_{11} = 0,0019$ — для режима 11-й позиции КМ и $a_{15} = 5,0$; $b_{15} = 177$; $k_{15} = 0,0021$ — для режима 15-й позиции КМ, т. е. ошибка по определению позиции ВМТ (коэффициент b) составила 2° и 3° соответственно. Эти результаты можно несколько улучшить, точнее задавая нижнюю границу варьирования коэффициента a (давление сжатия в ВМТ) и верхнюю границу диапазона аппроксимации (начало видимого горения $n_{ик}$). Если значения коэффициентов a и k принять одинаковыми для всех анализируемых циклов в потоке данных давления, то можно с большой вероятностью утверждать, что положение ВМТ будет найдено идентично. Погрешность определения ВМТ по отношению к действительному значению можно скомпенсировать по одному из известных методов [4, 5].

К недостаткам изложенного подхода следует отнести зависимость результатов от опытных данных о режиме двигателя. Кроме того, реализация алгоритмов аппроксимации представляется затруднительной для устройств, выполненных на базе микроконтроллеров, ввиду ограниченности низкоуровневых языков программирования. Вероятно, в этом случае целесообразно разграничить функции сбора данных и их обработки между приборной частью и персональным компьютером.

Вторая стратегия бесфазовой синхронизации ИД заключается в поиске характерных точек на кривой давления, повторяющихся от цикла к циклу. Обнаружить такие точки сравнительно легко, если представить данные с датчика давления не в виде $p(n)$, а в виде $p'(n)$ — скорости изменения давления (рис. 3, а). Последовательность выполняемых при этом действий можно представить следующим порядком:

- численно дифференцируют опытную функцию $p(n)$;
- ищут локальные максимумы полученной функции $p'(n)$ в пределах участков сжатия как корни уравнения $p'' = 0$ (рис. 3, б);
- определяют период дискретизации в единицах угла поворота кривошипа (пересчет оси n в φ);
- положение ВМТ определяют смещением на $\Delta\varphi$ вправо относительно позиций найденных максимумов $n_{i \max}$.

Величина смещения $\Delta\varphi$ между максимумом скорости нарастания давления на участке сжатия и положением ВМТ на развернутой индикаторной диаграмме зависит от ряда факторов. Рассмотрим аналитически связь этой величины с параметрами двигателя. Для простоты анализа будем считать процесс сжатия политропным с постоянным значением показателя политропы. Уравнение этого процесса

$$pV^{n_1} = C, \quad (2)$$

где V — объем рабочей камеры; n_1 — средний показатель политропы сжатия; C — константа.

Зависимость между объемом и углом поворота кривошипа представим упрощенным выражением, пренебрегая членами выше второго порядка

$$V = V_c + \frac{\pi D^2}{4} R \left[1 - \cos\varphi + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right], \quad (3)$$

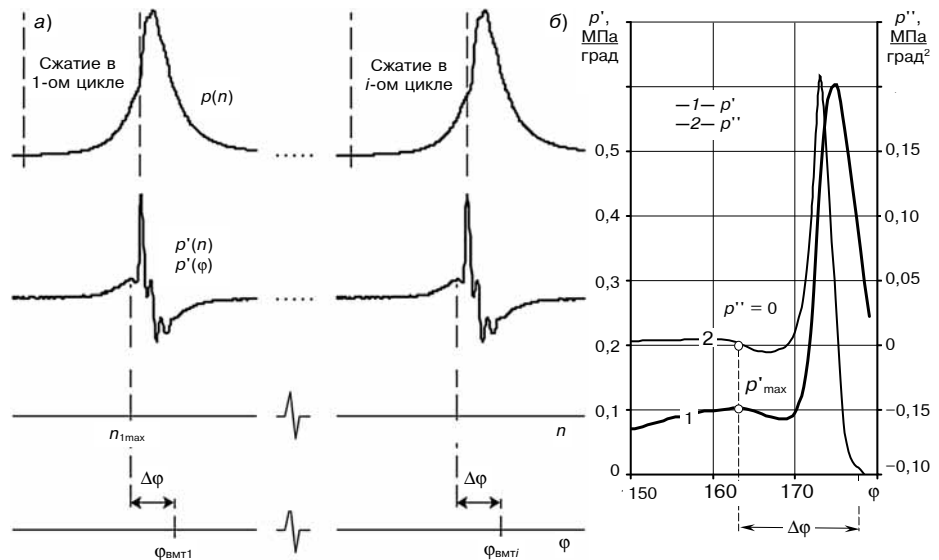


Рис. 3. Принцип синхронизации (а) на основе максимума скорости нарастания давления на участке сжатия по результатам численного дифференцирования сигнала давления (б)

где V_c — объем камеры сгорания; D — диаметр цилиндра; R — радиус кривошипа; λ — отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Подставим выражение (3) в (2) и дважды продифференцируем по φ . После преобразований получим

$$p'' = \cos\varphi + \lambda \cdot \cos 2\varphi - \frac{(n_1 + 1) \left(\sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right)^2}{\frac{4V_c}{\pi D^2 R} + \left[1 - \cos\varphi + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right]}. \quad (4)$$

Этот результат показывает, что фазовое положение экстремумов скорости изменения давления не зависит от режимных параметров (если только не учитывать переменность n_1), а определяется геометрией цилиндра и кривошипно-шатунного механизма двигателя. Для определения экстремума вблизи ВМТ конца сжатия достаточно приравнять правую часть выражения (4) к нулю и найти корень полученного уравнения на интервале $\varphi = [\pi, 2\pi]$. Так как выражение (4) достаточно громоздко для аналитического решения, удобно воспользоваться приближенными численными методами, реализованными во многих прикладных математических пакетах.

Необходимо учитывать, что найденное значение на основании уравнения (4) не может претендовать на абсолютную точность. Помимо погрешности, возникающей в связи с допущением о постоянстве показателя политропы, уравнение (4) не учитывает еще и утечки рабочего тела из рабочей камеры. Этот фактор, как показано в работе [5], существенно влияет на фазовые характеристики ИД относительно действительного положения ВМТ.

Для уточнения значений $\Delta\phi$ было выполнено исследование на численной реализации развернутой математической модели процесса сжатия. Основные положения модели представлены в работах [5, 6]. Модель корректно учитывает теплообмен между рабочим телом и стенками камеры, а также утечки рабочего тела через неплотности в цилиндре.

В таблице представлены сравнительные результаты расчетных исследований на упрощенной аналитической модели (4) и на развернутой численной модели. Здесь же приведены результаты определения $\Delta\phi$ по экспериментальным данным для некоторых тепловозных дизелей.

Анализ полученных данных показывает, что результаты расчета по упрощенной модели достаточно хорошо согласуются с более точными расчетами. Таким образом, для определения расчетного значения $\Delta\phi$ на практике нет необходимости прибегать к развернутому моделированию процесса сжатия. Разброс значений экспериментальных данных объясняется погрешностью измерения сигнала давления и отклонениями в техническом состоянии реальных двигателей. Наиболее существенно на фазе максимума скорости нарастания давления сказывается изменение объема камеры сгорания. Это обстоятельство необходимо учитывать, так как индцирование в условиях эксплуатации осуществляется, как правило, через индикаторный кран, что приводит к изменению объема камеры сгорания на величину объема индикаторного канала. Кроме того, конструкцией многих двигателей предусмотрено регулирование этой величины при ремонте и техническом обслуживании, а следовательно, не исключена возможность изменения объема из-за технологических нарушений.

Рис. 4 дает представление о влиянии на величину $\Delta\phi$ изменения объема V_c относительно номинального значения $V_{cн}$.

Определенные сложности для точного нахождения позиции ВМТ на основе смещения $\Delta\phi$

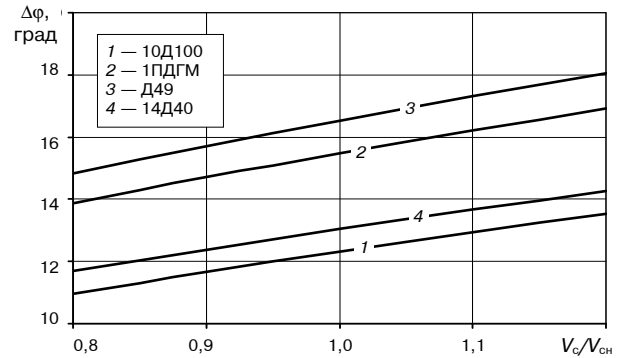


Рис. 4. Влияние изменения объема камеры сгорания на величину $\Delta\phi$

возникают еще и в связи с тем, что вблизи максимума скорости нарастания давления в дизелях начинается (или уже протекает) впрыскивание топлива, изменяющее картину теплообмена в цилиндре. Это сказывается и на характере кривой p' . При увеличенных углах опережения подачи топлива фазовая координата точки начала видимого горения может оказаться равной или даже большей чем $\Delta\phi$. Еще одним недостатком метода является повышенная чувствительность к качеству сигнала с датчика давления: шумы, искажающие действительный сигнал давления, гораздо заметней на его производных p' и p'' .

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

✓ Предложенные стратегии отражают лишь часть проблем, связанных с установлением действительной временной характеристики ИД при экспериментальном измерении сигнала давления.

✓ Учитывая, что погрешность в определении ВМТ в рассматриваемых методах может достигать 3° и более угла поворота коленчатого вала, на завершающей стадии обработки данных обязательно требуется расчетная коррекция положения ВМТ.

✓ Следует констатировать, что успех диагностирования рабочего процесса поршневого двигателя в огромной степени зависит от установления

Сравнение результатов определения $\Delta\phi$ экспериментальными данными

Дизель					Смещение $\Delta\phi$ между максимумом p' участка сжатия и ВМТ, определенное на основании			
Тип	D, мм	R, мм	V_c , л	λ	упрощенной модели (4) при		развернутой модели	эксперимента**
					$n_1 = 1,36$	$n_1 = 1,38$		
10Д100	207	2×127	0,9252	$\frac{0,217^*}{0,185}$	12,40	12,32	12,56	13–15***
1ПДГМ	318	165	2,279	0,233	15,56	15,48	15,49	—
Д49	260	130	1,461	0,307	16,61	16,53	16,52	15–17
14Д40	230	150	0,7714	0,246	13,11	13,04	13,05	12,5–14

* Верхний/нижний; ** ВМТ по максимуму давления ИД без подачи топлива; *** за ВМТ принято положение максимального сближения поршней.

действительной временной характеристики ИД, которая определяется уровнем описания термогазодинамических процессов в цилиндре двигателя и точностью измерения сигнала давления в условиях рядовой эксплуатации.

Литература

1. DEPAS Laboratory [Электронный ресурс] // Depas Laboratory. — 2005. — Режим доступа: <http://www.depas.odessa.ua>.

2. Варбанец Р.А. DEPAS 3.1 Handy — система мониторинга рабочего процесса судовых дизелей [Текст] / Р.А. Варбанец, В.Г. Ивановский, Ю.Н. Кучеренко // Сборник докладов 7-й международной конференции «Российское судостроение и судоходство на мировом рынке НЕВА-2003». — СПб., 2003. — С. 114–115.

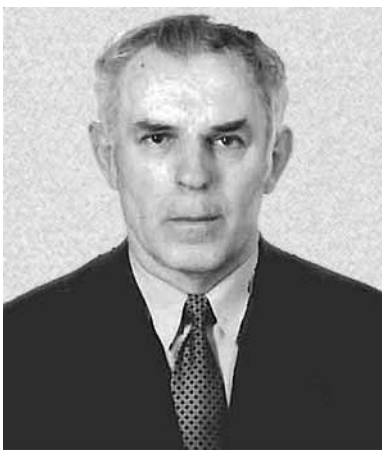
3. Васин П.А. Для диагностики тепловоза — комплекс «Магистраль» // Локомотив. — 2001. — № 7. — С. 27–31.

4. Обозов А.А. Алгоритм поиска корректного положения отметки ВМТ в системах диагностики судовых дизелей // Двигателестроение. — 2006. — № 1. — С. 27–30.

5. Лашко В.А., Коньков А.Ю. Расчетный метод коррекции действительного положения ВМТ при индцировании ДВС // Двигателестроение. — 2007. — № 3. — С. 34–38.

6. Лашко В.А., Коньков А.Ю. Применение методов имитационного моделирования рабочих процессов дизеля при интерпретации результатов диагностического эксперимента // Известия вузов. Машиностроение. — 2007. — № 6. — С. 46–53.

ЮБИЛЕЙ!



Николаю Дмитриевичу Чайнову 70 лет

3 ноября 2007 г. исполнилось 70 лет Николаю Дмитриевичу Чайнову, заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору, члену редакционной коллегии журнала «Двигателестроение»

Николай Дмитриевич Чайнов родился 3 ноября 1937 г. в Москве. После окончания МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г. остался работать на кафедре «Поршневые двигатели» в должности ассистента. Успешно

совмещая преподавательскую и научную работу, в 1964 г. защитил кандидатскую, а в 1976 г. докторскую диссертацию; в 1978 г. ему было присвоено ученое звание профессора.

Сегодня профессор Н.Д. Чайнов является крупным ученым в области прочности и термочности конструкций двигателей внутреннего сгорания. По различным направлениям прочностного анализа узлов и деталей современных поршневых двигателей им опубликовано свыше 160 научных работ, в том числе монография, а также разделы в пяти учебниках, написанных коллективом кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, получено 5 авторских свидетельств на изобретения.

Под руководством профессора Н.Д. Чайнова подготовлены и защищены более 30 кандидатских и докторская диссертация. Результаты расчетно-экспериментальных исследований в области тепловой напряженности форсированных дизелей, выполненных на кафедре Н.Д. Чайновым и его учениками, внедрены в отрасли двигателестроения.

Применительно к теплонапряженным деталям поршневого двигателя им впервые были выполнены исследования деформирования за пределами упругости, в том числе в области ползучести, что является необходимым элементом при оценке прочности и ресурса теплонапряженных элементов форсированных двигателей.

На протяжении всей трудовой деятельности и в настоящее время профессор Н.Д. Чайнов тесно сотрудничает с ведущими двигателестроительными заводами: Коломенским тепловозостроительным заводом, Ярославским моторным заводом, Харьковским заводом транспортного машиностроения им. Малышева и др., отраслевыми научно-исследовательскими институтами (ЦНИДИ, НИИД, НАТИ, ВНИИТМ, НИКТИД и др.) и зарубежными фирмами.

Профессор Н.Д. Чайнов постоянно и активно участвует в научной и общественной деятельности. В течение ряда лет он возглавлял работу кандидатского диссертационного совета. В настоящее время работает заместителем председателя докторского диссертационного совета в МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также входит в состав диссертационных советов ВНИИТМ, МАМИ, научный совет РАН по проблемам транспорта. В течение многих лет он бесценно руководит Всероссийским семинаром по двигателям внутреннего сгорания на кафедре МГТУ «Поршневые двигатели», входит в состав редакционной коллегии журнала «Двигателестроение» с момента его основания.

Сотрудники кафедры «Поршневые двигатели», редакция журнала «Двигателестроение», друзья и коллеги поздравляют профессора Н.Д. Чайнова с юбилеем и желают ему крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов в деле, которому он посвятил всю свою жизнь