

УДК 621.43

**Применение динамических моделей поршневых двигателей  
внутреннего сгорания для решения комплексных задач**

**И.Е. Агуреев, М.Ю. Елагин, Р.Н. Хмелев, А.И. Волков**

Тулский государственный университет

**The usage of piston internal combustion engines dynamic  
models to complex problems**

**Agureev I.E., Elagin M.U., Khmelev R.N., Volkov A.I.**

Tula State University

*В статье изложены основные результаты применения динамических моделей для исследования функционирования и расчета поршневых двигателей внутреннего сгорания. Показаны потенциальные возможности практического использования и области применения моделей.*

*Ключевые слова: поршневой двигатель внутреннего сгорания, динамическая система, динамическая модель, переходные процессы.*

*This paper describes the basic results of using of dynamic models to application in the operation and calculation of piston engines studies. The potential features of practical using and application spheres of models are shown.*

*Key words: piston internal combustion engine, dynamic system, dynamic mode, transient processes.*

Современный этап исследований поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС) характеризуется большим разнообразием применяемых математических моделей, способность которых описывать динамические явления постоянно возрастает [1–8]. Такие модели разрабатываются коллективами ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана, РУДН, ТОГУ, УГАТУ, а также других ВУЗов и организаций.

В то же время, охватить единой детальной динамической моделью ПДВС, как систему, затруднительно и нецелесообразно вследствие высо-

ких затрат вычислительных ресурсов и проблем унификации и согласования математического описания всех процессов. Это особенно актуально для неустановившихся режимов работы, характеризующихся сложной взаимосвязью всех элементов ПДВС.

Среди математических моделей, описывающих отдельные аспекты работы ПДВС как динамической системы, следует назвать работы [1–8].

В настоящей работе рассматривается теоретический аппарат, обеспечивающий анализ функционирования ПДВС во времени как единой динамической системы, исследование сложных явлений, присущих поршневым двигателям, а также определение параметров двигателя на стадии проектирования. Подход базируется на иерархической системе динамических моделей ПДВС, обеспечивающих рациональное сочетание сложности и полноты описания взаимосвязанных механических, термодинамических, газодинамических и гидродинамических процессов, с возможностью выбора инженером-исследователем моделей требуемого уровня.

Базовой моделью ПДВС (моделью низшего уровня сложности) является разработанная в рамках термодинамики открытых систем [9, 10] фазово-функциональная динамическая модель, отражающая основные особенности двигателя как системы, преобразующей энергию во времени, и состоящая из двух основных подсистем уравнений:

а) подсистемы, описывающей изменение состояния рабочего тела в цилиндре:

$$\dot{\rho} = \rho(\rho, T, \omega, \varphi; \Theta); \quad \dot{T} = T(\rho, T, \omega, \varphi; \Theta); \quad (1)$$

б) подсистемы, описывающей движение механизмов:

$$\ddot{\varphi} = \varphi(\rho, T, \omega, \varphi; \Theta). \quad (2)$$

Замыкающим является уравнение состояния:

$$p = \rho \cdot R \cdot T. \quad (3)$$

В уравнениях (1)–(2) используются дополнительные зависимости,

определяющие отдельные процессы в ПДВС;  $\Theta$  – набор функций и параметров.

Система уравнений (1)–(3) в рабочей форме может быть записана для одноцилиндрового или многоцилиндрового двигателя с произвольным механизмом преобразования движения.

Решения уравнений (1)–(3) динамической модели ПДВС определяют изменение фазовых координат  $(p, T, \omega, \varphi)$  во времени. С их помощью можно определить условия существования устойчивого автоколебательного режима работы двигателя, его параметры, а также найти количественные показатели переходных процессов, возникающих в двигателе при воздействии различных возмущений. Модель позволяет оценить значения показателей, определяющих работу систем ПДВС. Эти показатели учитываются в динамической модели ПДВС в виде функций  $\dot{Q}_e, \dot{Q}_m, G_{nj}, G_{pj}, F_{mp}$  (горение, теплообмен, газообмен, механические потери и др.).

Помимо экономичной базовой динамической модели, которая применяется на начальных этапах анализа процесса функционирования ПДВС, были разработаны высокоуровневые динамические модели ПДВС, используемые для решения частных задач, связанных с кардинально влияющими на работу двигателя процессами (системами). Высокоуровневые динамические модели предназначены для исследования и расчета пространственных газо- и гидродинамических процессов [11, 12], системы топливоподачи, системы автоматического регулирования частоты вращения [13], неустойчивости и колебаний двигателя на подвеске [11], динамических явлений в системе «Автомобильный двигатель-Нагрузка» [14]. Модели были апробированы в процессе расчетов двигателей ТМЗ-450Д, ВАЗ-2106, ВАЗ-2111, ЗМЗ-406 и др.

Анализ применения динамических моделей позволяет сделать следующие выводы:

1) Разработанная иерархическая система динамических моделей более адекватно описывает переходные режимы работы ПДВС как системы «в целом» по сравнению с существующими квазидинамическими моделями [1, 4] за счет более полного учета внутрициклового и межциклового изменения показателей работы двигателя. В частности, расхождения результатов расчетов переходных режимов работы ПДВС по динамической и квазидинамической моделям в определении характеристик системы топливоподачи достигают 23 %, параметров газовоздушного тракта – 2 %, эффективных показателей работы двигателя – 12 % (рис. 1).

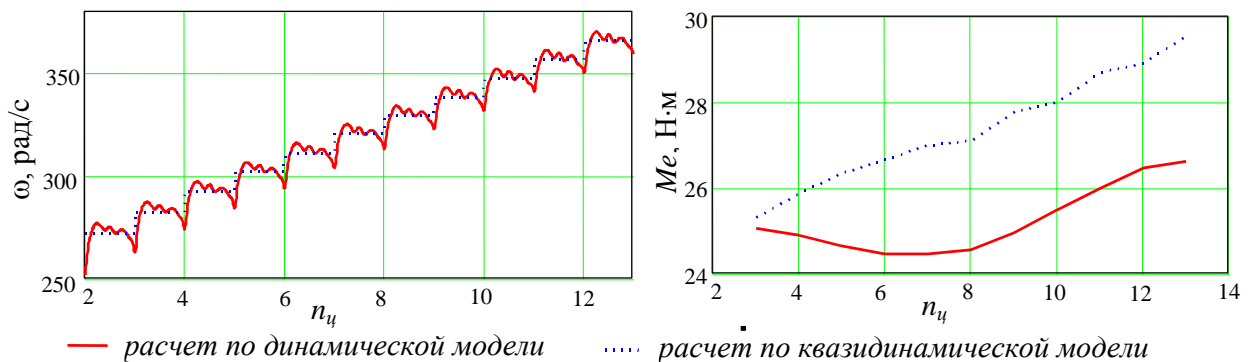


Рис. 1. Результаты расчета угловой скорости и крутящего момента в переходном режиме, полученные с помощью динамической и квазидинамической моделей

2) Разработанные динамические модели позволяют в полном объеме выполнять расчеты как статических, так и динамических характеристик ПДВС [11].

3) По результатам вычислительных экспериментов на динамических моделях выработаны рекомендации [15] по повышению эффективности функционирования дизеля ТМЗ-450Д в составе с электроагрегатом и двигателя ВАЗ-2111.

Рациональный выбор параметров газовоздушного тракта и системы газообмена позволил увеличить крутящий момент и мощность дизеля ТМЗ-450Д на 7,5 % (рис. 2) [15]; выбор параметров системы автоматиче-

ского регулирования частоты вращения позволил уменьшить наклон регуляторной ветви с  $\delta = 5,07\%$  до  $\delta = 4,80\%$ , а время переходного процесса – с  $\tau = 1,1\text{ с}$  до  $\tau = 0,44\text{ с}$  [15].

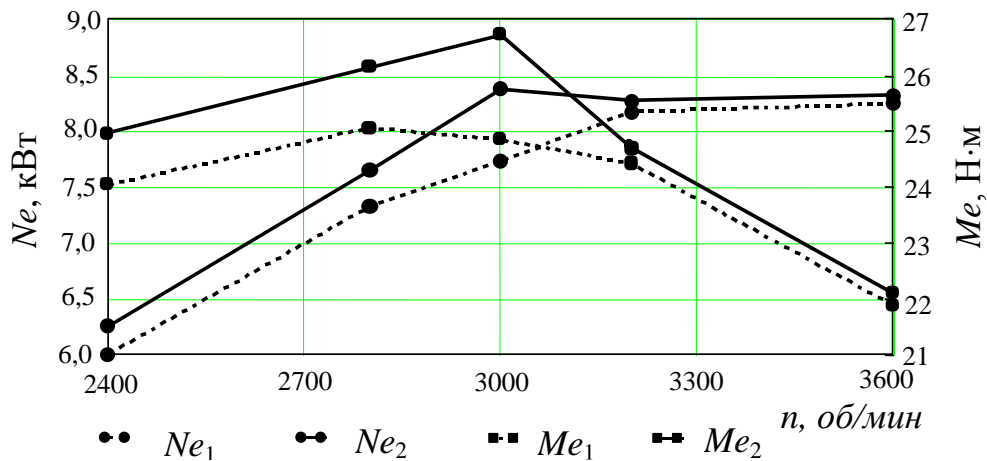


Рис. 2. Сравнение показателей работы двигателя с улучшенной (2) и базовой (1) конструкцией ГВТ и системы газообмена

Для двигателя ВАЗ-2111 выработаны и подтверждены экспериментально практические рекомендации [12] по модернизации впускной системы (рис. 3). При этом было получено снижение межцилиндровой неравномерности по мощности и среднему индикаторному давлению на частоте 2000 об/мин на 21 %, на частоте 5000 об/мин на 16 %, мощностные характеристики двигателя улучшились на 6–8 %



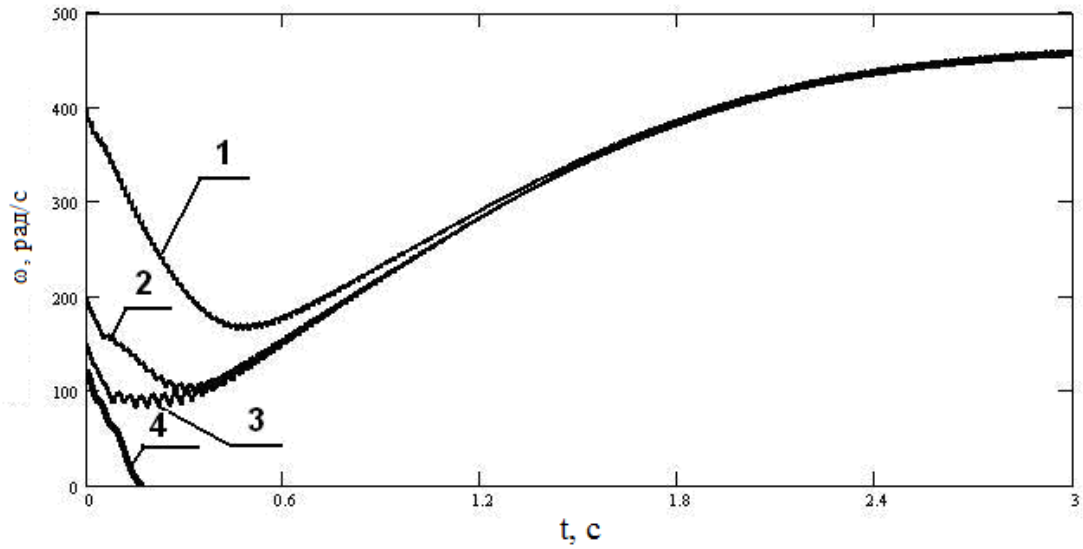
Рис. 3. Двигатель ВАЗ-2111 с модернизированной системой впуска

4) Использование предложенных динамических моделей позволяет рассматривать ПДВС как нелинейную диссипативную термомеханическую систему, для которой в полной мере применим аппарат нелинейной динамики. Нелинейная динамика [16-19] становится теоретической основой для исследования сложных явлений, присущих ПДВС. Среди них отметим следующие.

1. Возможность существования одновременно нескольких направлений развития переходных процессов. Такая возможность обусловлена: а) выбором начальных и/или граничных условий; б) принятыми значениями параметров модели. Ниже приведен расчет границы между двумя устойчивыми режимами – положением равновесия ( $\omega = 0$ ) и устойчивым предельным циклом, полученную для одной и той же последовательности изменения регулирующих органов (рис. 4). В качестве начального условия выбрано значение угловой скорости.

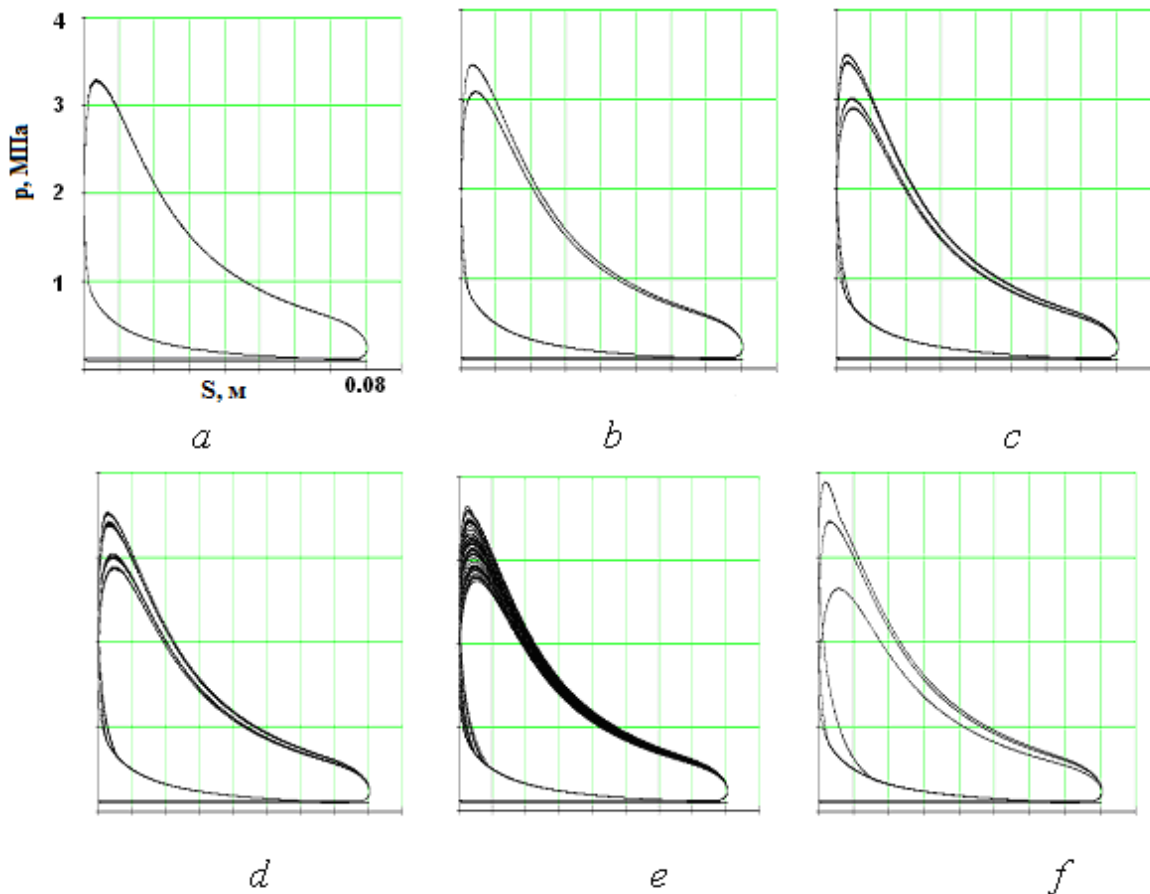
2. Бифуркационный характер зависимости динамических (фазовых) переменных от параметров конструкции, свойств рабочих тел и т.д.

3. Существование сложных стационарных режимов, которые описываются не единственной, повторяющейся из цикла в цикл индикаторной диаграммой, а являются по сути нерегулярным (хаотическим) режимом. На более глубоком уровне бифуркационные свойства ПДВС рассматриваются в известной проблеме межциклового неидентичности (МЦН) [18, 19]. Показано, что МЦН может рассматриваться как результат перехода к нерегулярному (хаотическому) режиму. Отметим, что собственно динамическая модель ПДВС даже в 0-мерной постановке уже способна демонстрировать способность к бифуркационному переходу к нерегулярному (хаотическому) режиму. На рис. 5 приведена последовательность индикаторных диаграмм, которым соответствуют циклы периода 1, 2, 4, 8, 3, а также хаотический режим, который может считаться отражением МЦН.



1 –  $\omega_0 = 400 \text{ рад/с}$ ; 2 –  $\omega_0 = 200 \text{ рад/с}$ ; 3 –  $\omega_0 = 150 \text{ рад/с}$ ; 4 –  $\omega_0 = 120 \text{ рад/с}$ ;

Рис. 4. Зависимость угловой скорости от начальных условий



а –  $M_c = 0,235 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  (цикл периода 1);

б –  $M_c = 0,2324 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  (цикл периода 2);

в –  $M_c = 0,2304 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  (цикл периода 4);

г –  $M_c = 0,23 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  (цикл периода 8);

д –  $M_c = 0,22945 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  (хаотический режим);

е –  $M_c = 0,2288 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  (цикл периода 3)

Рис. 5. Проекция фазовых портретов (индикаторные диаграммы) различных аттракторов модели ПДВС в зависимости от параметра внешней нагрузки

4. Способность к генерации упорядоченных (диссипативных) структур на самых различных уровнях описания.

Развиваемый подход позволяет описать работу двигателя как единой динамической системы с учетом сложных взаимосвязей ее элементов. Динамические модели имеют перспективы дальнейшего развития и являются эффективным инструментом оптимизационных расчетов поршневых двигателей на установившихся и переходных режимах, что подтверждается практическим опытом их применения.

#### Литература

[1]. Патрахальцев Н.Н. *Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания*: монография. Москва, Изд-во РУДН, 2009. 380 с.

[2]. *Влияние формы внешней скоростной характеристики на токсичность отработавших газов дизеля в переходных процессах* / В.А. Марков [и др.] // Сб. научн. тр. по матер. междунар. конф. «Двигатель 2007». Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, с. 329–335.

[3]. Кузнецов А.Г. *Разработка методов и средств повышения эффективности работы дизелей на динамических режимах*: автореф. дис... докт. техн. наук. Москва, 2010. 32 с

[4]. Тимошенко Д.В. *Исследование и улучшение динамических качеств переходных режимов работы КДВС*: дис... канд. техн. наук. Хабаровск, 2004. 196 с.

[5]. *Машиностроение*. Энциклопедия. Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. *Двигатели внутреннего сгорания*. Т. IV-14 / Л.В. Грехов, Н.А.



Иващенко, В.А. Марков и др.; под общ. ред. А.А. Александрова и Н.А. Иващенко. Москва, Машиностроение, 2013. 784 с.

[6]. P. Falcone, M. De Gennaro, G. Fiengo, S. Santini, L. Glielmo and P. Langthaler, “Torque generation model for Diesel Engine”, 42nd IEEE Conference on Decision and Control 2003, Hawaii, USA, Dicembre 2003.

[7]. Regner G., Loibner E., Krammer J., Walter L., Truemner R. Анализ переходных ездовых циклов с применением совместного моделирования CRUISE – BOOST // АПС Консалтинг. URL: [http://www.aps-c.ru/publications/boost\\_cruise\\_rus.pdf](http://www.aps-c.ru/publications/boost_cruise_rus.pdf) (дата обращения 30.03.2012).

[8]. L. Guzzella, C. Onder Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems 2010 Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 354 p.

[9]. Малиованов М.В. *Динамическая теория ДВС (целесообразность создания и этапы разработки)* // Изв. ТулГУ, Сер. «Автомобильный транспорт». Тула, Изд-во ТулГУ, 1998. Вып. 2, с. 189–196.

[10]. Елагин М.Ю. *Термодинамика открытых систем*: монография. Тула, Изд-во ТулГУ, 2013. 400 с.

[11]. Хмелев Р.Н. *Разработка теоретических основ определения параметров поршневых двигателей как единой динамической системы для повышения эффективности их функционирования*: автореф. дис... докт. наук. Тула, ТулГУ, 2011. 40 с.

[12]. Елагин М.Ю., Смекалин В.В., Хмелев Р.Н. *Модернизация впускной системы автомобильного двигателя* // Известия ТулГУ. Серия «Автомобильный транспорт». Тула, Изд-во ТулГУ, 2005. Вып. 9, с 96–100.

[13]. Базаева Н.С., Малиованов М.В., Хмелев Р.Н. *Моделирование систем топливоподачи и автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя* // Известия ТулГУ. Серия «Технические науки». Тула, Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 1, с. 172–178.

[14]. Радько А.Е., Хмелев Р.Н. *Математическое моделирование, исследование и расчет динамических процессов в системе «автомобильный*

*двигатель – нагрузка» // Материалы МНПК «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе». Пермь, ПНИПУ, 2016, с. 101–104.*

[15]. Малиованов М.В., Хмелев Р.Н. *Разработка методики проектировочных расчетов поршневых двигателей внутреннего сгорания // Материалы МНПК «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе», Том 1. Пермь, ПНИПУ, 2012. с. 290–293.*

[16]. Агуреев И.Е. *Нелинейные динамические модели поршневых двигателей внутреннего сгорания: Синергетический подход к построению и анализу: монография. Тула, Изд-во ТулГУ, 2001. 224 с.*

[17]. Магницкий Н. А., Сидоров С. В. *Новые методы хаотической динамики. Москва, Эдиториал УРСС, 2004. 320 с.*

[18]. A simple model for cyclic variations in a spark-ignition engine / C. Daw, C.E.A. Finney, J.B.Green et al. // SAE Technical Paper Series, Paper 962086. 1996.

[19]. Nonperiodic oscillations in a spark ignition engine / M. Wendeker, G. Litak, J. Czarnigowski et al. // Int. J. Bifurcations and Chaos. 14. 2004. P.1801-1806.