

УДК 629.3

С.М. Огороднов, П.С. Рогов, С.И. Малеев

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ
ЧАСТНЫХ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Проведен обзор существующих методов определения механической карты двигателей внутреннего сгорания, а именно, зависимостей крутящего момента от оборотов двигателя при различном уровне подачи топлива. Рассмотрены экспериментальные и расчетные методы. Перечислены основные достоинства и недостатки этих методов.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, механическая карта, эксперимент, аппроксимация, крутящий момент.

В настоящее время подавляющее количество современных автомобилей оснащается двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в основном двух типов – бензиновых и дизельных. Именно ДВС во многом определяют эксплуатационные свойства автомобиля (тягово-скоростные, топливной эффективности, количество выбросов вредных веществ).

Кроме того, современные представления о характере движения автомобиля в реальных условиях, основанные на вероятностном представлении параметров продольного макропрофиля дорог, распределениях скоростей движения на разных передачах в пределах маршрута движения по дороге с определенным типом продольного макропрофиля позволяют на ранних этапах проектирования определить возможные средние скорости движения по различным маршрутам, оптимальные скорости движения по критерию топливной эффективности, максимальную скорость движения и другие не менее значимые показатели эксплуатационных свойств.

Выбор ДВС для конкретной модели автомобиля и последующая оптимизация передаточных чисел трансмиссии с целью получения оптимальных показателей некоторых эксплуатационных свойств основан на исследовании определенных параметров и характеристик ДВС.

Одна из наиболее важных характеристик ДВС – его механическая карта, а именно, зависимость крутящего момента от оборотов двигателя при различных уровнях подачи топлива. Особенностью этой характеристики двигателя является возможность выполнения в дальнейшем аналитических исследований для определения эксплуатационных свойств автомобиля, основанных на использовании «частичных» характеристик ДВС, определяемых в настоящей работе как зависимости крутящего момента, мощности и некоторых других параметров от частоты вращения коленчатого вала при ограничении подачи топлива на определенном уровне.

Наиболее традиционным инструментом получения механической карты в процессе экспериментальных исследований является динамометрический стенд для испытаний двигателя. Так, в статье [1] приведена методика построения механической карты, с применением динамометрического стенда для испытаний двигателя. На основе полученных данных производится калибровка и оптимизация параметров двигателя для достижения улучшенных показателей топливной экономичности при соответствии требованиям к выбросам вредных веществ. При несомненных достоинствах такого метода на результаты эксперимента могут оказывать влияние особенности выполнения его циклов.

В некоторых случаях для получения необходимых характеристик могут применяться и другие, достаточно сложные способы проведения экспериментальных исследований. Например, в работе [2] для определения параметров механической карты ДВС используется стенд с беговыми барабанами, на которые устанавливается автомобиль (автотранс-

портная система, АТС). Этот способ позволяет получать в процессе испытаний фактические параметры. Испытание АТС с приводом от собственного двигателя при существенном упрощении конструкции стенда требует поддержки компьютерной системой обработки результатов. В работе отмечается, что при выполнении динамических испытаний (при резком нагружении дополнительным динамическим моментом) искажаются частичные характеристики. Искажение характеристики возможно и при статических испытаниях, также осуществляемых с использованием тормозных механизмов с фиксацией величины тормозного момента не менее 5 с. В этом случае в работе [2] предлагается методика расчета внешней и частичных характеристик двигателя, основанная на использовании экспериментально полученных величин максимальной мощности и соответствующей максимальной мощности частоте вращения коленчатого вала двигателя.

В работе предлагается методика расчета указанных характеристик, основанная на произвольной градации частичных режимов. Ступени градации принимаются в диапазоне $0,3 \leq r \leq 1$, причем $r = 1$ соответствует внешней скоростной характеристике, а показатель частичной характеристики определяется выражением

$$r = \frac{n_r - n_x}{n_N - n_x} = \frac{N_r}{N_{\max}}, \quad (1)$$

где n_N, n_r – частоты вращения коленчатого вала двигателя при максимальной мощности ($r = 1$) и при максимальной мощности на частичном режиме ($r < 1$) соответственно; n_x – частота вращения коленчатого вала при холостом ходе.

Следующим шагом определяется максимальная частота холостого хода. При этом допускается ряд предположений, касающихся линейности вводимых коэффициентов коррекции максимальных оборотов холостого хода. В результате значения этих коэффициентов принимаются ориентировочно и в последующем уточняются по результатам фактических замеров, полученных в процессе испытаний. Зависимость мощности $N(n, r)$ в режиме работы двигателя на частичных характеристиках и в диапазоне $n_x \leq n \leq n_r$ строится на основании известной формулы Лейдермана. Для расчета характеристики мощности $N(n, r)$ на участке $n_r \leq n \leq n_{r_{\max}}$ в анализируемой работе предлагается формула Лейдермана – Ходеса, подобная формуле Лейдермана, но позволяющая корректировать коэффициенты C_1 и C_2 дополнительно вводимыми коэффициентами, учитывающими параметры

$$\frac{n - n_x}{n_r - n_x}. \quad (2)$$

В результате предлагается, в соответствии с выражением

$$M = 9554 \frac{N}{n}, \quad (3)$$

рассчитать параметры частичных характеристик, уточнив их в процессе дополнительных стендовых испытаний. Сложность и неоднозначность результатов вычисления частичных характеристик в этом случае очевидна. Описанный в указанной статье метод также подразумевает определенные аналитические вычисления.

В статье [3] приводится методика экспериментального определения параметров механической карты двигателя при движении автомобиля по смешанному циклу. Для этой цели используются средства бортовой диагностики автомобиля (OBD).

Для методов, указанных в работах [1] и [2], необходимо наличие специального динамометрического стенда. Кроме того, для методов, указанных в [2] и [3], необходимо, чтобы двигатель был установлен в существующий автомобиль. Во многих случаях при проектировании прорабатывается возможность установки на автомобиль нескольких конструктивных вариантов двигателей и выбор наиболее оптимального по заданным критериям для объекта проектирования. Таким образом, применение экспериментальных методов определения параметров механической карты ДВС, несмотря на значительные материальные затраты, является необходимой процедурой.

Существенное достоинство экспериментальных методов в достоверности получаемых результатов. Из недостатков следует отметить, что во всех трех указанных выше методах для проведения исследований необходимо присутствие объекта исследования, причем для достижения достоверности результатов проводить испытания для выборки, состоящей из нескольких двигателей. В этом случае достоверность результатов тем выше, чем больше объем выборки, т. е. достоверность результатов испытаний должна быть обеспечена увеличением их объемов и стоимости. Другой особенностью полученных результатов является существенная нелинейность экспериментальных характеристик. Во многих случаях использование характеристик двигателя в виде массива данных ограничено определенными соображениями. В этих случаях могут использоваться известные методики, позволяющие корректировать экспериментальные характеристики (методы аппроксимации).

Кроме экспериментальных и экспериментально-аналитических методов, предполагающих достаточно сложный и материально затратный процесс получения необходимых характеристик, в настоящее время существуют аналитические методы построения частичных характеристик. Их трудоемкость и затраты, связанные с реализацией невелики, поэтому развитие аналитических методов расчетов, указанных характеристик ДВС представляется целесообразным.

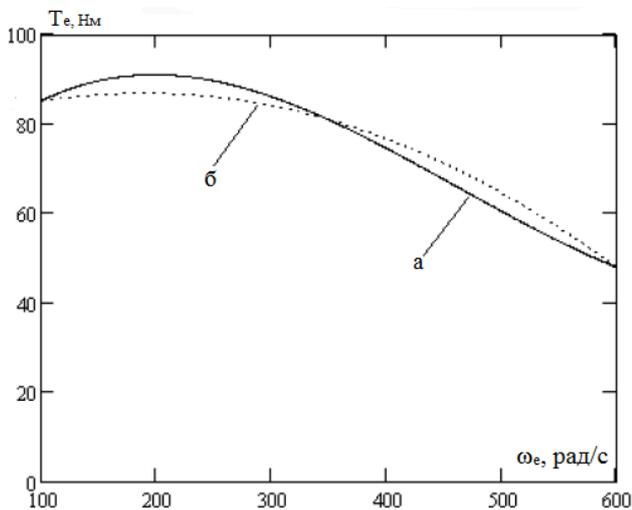


Рис. 1. Частичные скоростные характеристики двигателя при 50%-ной подаче топлива:
а — полином 3-й степени, б — полином 2-й степени

нию поверхности $T_e(\omega_e, \beta)$, где ω_e — обороты коленчатого вала; β — уровень подачи топлива, проходящий через массив точек, описывающий поверхность в координатах (T_e, ω_e, β) . Поверхность создается участками двумерных сплайнов, являющихся функциями (ω_e, β) , и имеющих непрерывные первые производные по обеим координатам. Это, по утверждению авторов, позволяет достаточно точно определять значение эффективного крутящего момента при любых уровнях подачи топлива и угловой скорости коленчатого вала.

Для большей наглядности сплайн-поверхность можно представлять в виде модели упругой пластины бесконечной протяженности деформируемой изгибом. Для построения поверхности, показанной на рис. 2, записываются достаточно сложные выражения функционалов гладкости, выражения для сплайн-функции в частных производных и из системы линейных выражений определяются значения коэффициентов c_i и C_N для уравнения (4), которое является полиномом аппроксимации частичных характеристик ДВС.

$$T_e(\omega_e, \beta) = \sum_{i=1}^N c_i r_i^2 \ln r_i^2 + C_{N+1} + C_{N+2} \omega_e + C_{N+3} \beta, \quad (4)$$

$$r^2 = (\omega_e - \omega_{e_i})^2 + (\beta - \beta_i)^2,$$

В работе [4] предложено математическое описание экспериментально полученных частичных скоростных характеристик двигателя с помощью интерполяционного полинома Лагранжа второго и третьего порядков, обеспечивающих высокую точность результатов. Режимы подачи топлива от 50 до 100% в этом случае описываются полиномом второго порядка, менее 50% — третьего порядка (рис. 1). Отмечено, что способ формирования возмущающего воздействия при исследовании динамических процессов в трансмиссии автомобиля, а именно, определение значения эффективного крутящего момента имеет большое значение.

В работе [5] предлагается способ определения частичных скоростных характеристик двигателей с помощью многомерной интерполяции, приводящей к построению

где T_e - текущее значение крутящего момента двигателя; C - аппроксимирующие коэффициенты; ω_e - обороты коленчатого вала, соответствующие текущему значению крутящего момента; ω_{ei} - обороты коленчатого вала, соответствующие значениям крутящего момента точек кривой частичной характеристики от 1 до N ; β - уровень подачи топлива, соответствующий текущему значению крутящего момента; β_i - уровень подачи топлива, соответствующий значениям крутящего момента точек кривой частичной характеристики от 1 до N .

Интерполяция сплайнами позволяет облегчить процесс численного интегрирования. По полученным экспериментальным данным функция интерполируется и строится функциональная зависимость описывающая поверхность, соответствующая различным значениям эффективного крутящего момента двигателя, в зависимости от уровня подачи топлива и оборотов коленчатого вала (рис. 2).

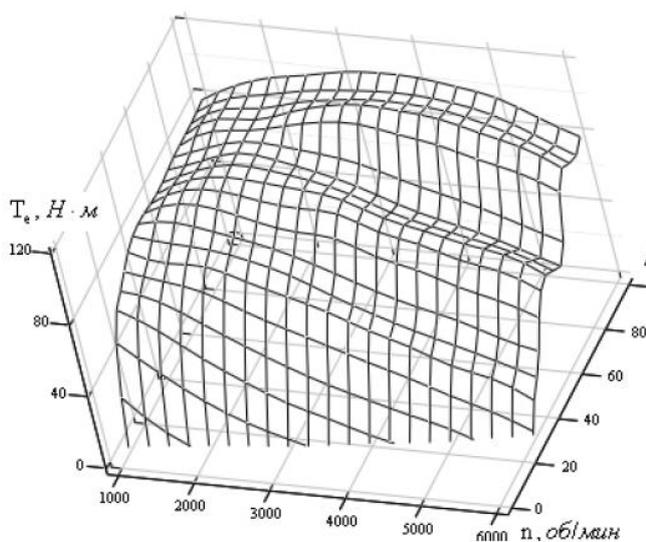


Рис. 2. Частичные скоростные характеристики двигателя

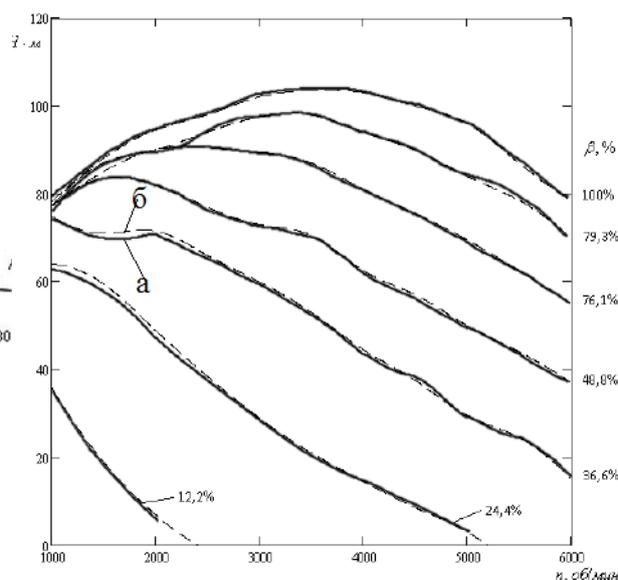


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные частичные характеристики двигателя: а – экспериментальные; б – расчетные

Отмечено, что полученная аппроксимация частичных скоростных характеристик ДВС достаточно точно совпадает с экспериментально полученными зависимостями (рис. 3).

В работе [6] предлагается поиск номинальных значений крутящих моментов частичных характеристик двигателя по формуле

$$M_{eNi} = M_{eH} \frac{n_{Xi} - n_H}{n_X - n_H}, \tag{5}$$

где M_{eNi} - номинальные эффективные крутящие моменты частичных характеристик двигателя; M_{eH} - номинальный эффективный крутящий момент внешней скоростной характеристики двигателя; n_X - максимальная частота вращения вала двигателя; n_{Xi} - максимальная частота вращения вала двигателя на частичных характеристиках; n_H - номинальная частота вращения двигателя.

Определение промежуточных значений крутящих моментов частичных характеристик предлагается выполнять в соответствии с выражением

$$M_{ei}(n) = M_{eNi} \left(\frac{n_{Xi} - n}{n_{Xi} - n_H} \right), \tag{6}$$

где $M_{ei}(n)$ - промежуточное значение крутящего момента частичных характеристик ДВС; n - частота вращения двигателя, соответствующая промежуточному значению крутящего момента.

Очевидно, что рассматриваемый метод [6] предполагает масштабирование кривой

внешней скоростной характеристики двигателя и использование характера кривой изменения крутящего момента при построении частичных характеристик.

В современных ДВС с электронной системой управления подачей топлива частичные характеристики крутящего момента имеют достаточно сложный аналитически предсказуемый вид. При различном уровне подачи топлива характер кривой зависимости момента от оборотов двигателя изменяется сложным образом. Вид реальных частичных характеристик современного дизельного ДВС показан на рис. 4. Поэтому при аналитическом определении параметров механической карты современных ДВС аппроксимация кривых полиномами третьего порядка или их масштабирование с большой долей вероятности не позволит получить достоверный результат.



Рис. 4. Частичные характеристики современного дизельного ДВС при 40, 60 и 80%-ном уровне подачи топлива

В данной статье будет проведен общий вероятностный анализ механической карты дизельного двигателя с целью поиска новых подходов к аналитическому определению частичных характеристик современных двигателей.

В результате исследования методов моделирования частичных скоростных характеристик установлено, что существующие методы можно разделить на экспериментальные (исследовательские) и расчетно-экспериментальные. В первом случае скоростные характеристики строятся по результатам испытаний двигателя на стенде, а затем аппроксимируются с применением известных методов. Во втором в процессе лабораторного эксперимента определяются значения нескольких точек внешней скоростной характеристики, по которым, в соответствии с некоторыми аналитическими зависимостями, строятся частичные характеристики.

Аналитические методы построения частичных характеристик во многих случаях требуют определения коэффициентов с неопределенным физическим смыслом, что делает их использование затруднительным при проведении инженерных расчетов. К тому же экспериментальное определение нескольких точек внешней скоростной характеристики требует полноценной подготовки эксперимента, а невозможность получения частичных характеристик в необходимом количестве, скорее всего, объясняется техническими особенностями стенда и оборудования.

Наиболее оптимальным способом получения частичных характеристик, по мнению авторов настоящей статьи, является полноценный натурный эксперимент. В этом случае наиболее сложный момент – аппроксимация полученных характеристик методом, обеспечивающим использование аппроксимирующих зависимостей для решения некоторых конкретных задач исследования динамики автомобиля.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта "Создание высокотехнологичного производства безопасных экспортоориентированных автомобилей ГАЗ с элементами автономного управления и возможностью интеграции с электроплатформой на базовых компонентах российского производства" по договору №03.G25.31.0270 от 29.05.2017 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218).

Библиографический список

1. **Barker, T.D.** Engine mapping techniques // Int. J. of Vehicle Design. – 1982. – V. 2. – № 3. – P. 142–152.
2. **Ходес, И.В.** Расчетно-экспериментальное определение внешней и частичных характеристик двигателя при испытании на стенде с приводом от собственного двигателя автотранспортной системы / И.В. Ходес, О.А. Бажин, С.В. Шелухин // Вестник СибАДИ. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. – С. 30–32.
3. **Bishop, J.** Engine maps of fuel use and emissions from transient driving cycles / J. Bishop [et al.] // Applied Energy. – 2016. – №183. – P. 202–217.
4. **Лукин, П. П.** К гармоническому анализу частичных скоростных характеристик карбюраторного двигателя / П. П. Лукин, Н. С. Соломатин // Надежность и активная безопасность автомобиля: сб. научных трудов МАМИ. – М.: МАМИ, 1985. – С. 270–282.
5. **Соломатин, Н. С.** Аппроксимация частичных скоростных характеристик двигателя внутреннего сгорания / Н. С. Соломатин, А. Г. Заморин, Е. М. Зотов // Изв. МГТУ МАМИ. – 2010. – №1. – С. 66–72.
6. **Бояркина, И. В.** Методика аналитического расчета частичных скоростных характеристик крутящего момента и часового расхода топлива двигателей внутреннего сгорания // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования - основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России: Всерос. научно-технич. конф. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2011. – С. 481–485.

*Дата поступления
в редакцию 30.01.2018*

S.M. Ogorodnov, P.S. Rogov, S.I. Maleev

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL METHODS FOR DETERMINATION OF PARTIAL VELOCITY CHARACTERISTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Analysis of known experimental and analytical methods for determination of the parameters of an internal combustion (IC) engine mechanical map.

Design/methodology/approach: Comparison of the effectiveness of the methods was carried out taking into account the reliability of the results, complexity of the approaches, necessary initial data and costs of experimental equipment.

Findings: Existing analytical methods for determination of the parameters of an IC engine mechanical map are not accurate enough to determine the characteristics of modern IC engines equipped with an electronic fuel control system.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of analytical determination of the parameters of an internal combustion (IC) engine mechanical map.

Originality/value: The study can be useful for choosing the most suitable method of an internal combustion (IC) engine mechanical map parameters determination and for assessing of the accuracy of the calculation of the traction and speed properties of vehicles.

Key words: internal combustion engine, mechanical map, experiment, approximation, torque.