

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СКОРОСТНЫХ И РЕГУЛЯТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЕЙ СО ВСЕРЕЖИМНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

*Г.Д. Драгунов, М.В. Гричанюк, О.Р. Якупов*

## MATHEMATICAL REPRESENTATION OF SPEED AND REGULATORY CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINES WITH CONTROLLER ALL-MODE

*G.D. Dragunov, M.V. Grichanyuk, O.R. Yakupov*

Выполнено отображение в форме аналитических зависимостей внешней скоростной и регуляторных характеристик дизелей. Уравнения содержат в явном виде главный управляющий параметр двигателя – положение органа управления подачей топлива.

*Ключевые слова:* дизель, скоростные, регуляторные характеристики, математическое представление.

Completed mapping in the form of analytical dependences of the external high-speed diesel engines and regulatory characteristics. The equations contain explicitly the main control parameter of the engine – the position of throttle body.

*Keywords:* diesel engine, speed, regular characteristics, mathematical representation.

При численном исследовании транспортных средств различного типа с дизельным двигателем внутреннего сгорания для отображения реальных режимов его работы необходимо представлять дизель совокупностью внешней и регуляторных скоростных характеристик. Эти характеристики должны входить в математическую модель движения транспортного средства. Поэтому наряду с требованиями достоверности и точности представление характеристик должно быть совместимым и достаточно простым для получения приемлемого по сложности решения общей системы уравнений.

Представим характеристику дизеля, предназначенную для анализа устойчивости и управляемости прямолинейного движения автомобиля и движения в повороте, анализа эффективности рулевого управления автомобиля в различных дорожных условиях. Двигатель включается в эти расчеты и анализы в основном тремя показателями:

- 1) скорость вращения коленчатого вала, связанная через передаточную функцию со скоростью движения автомобиля;
- 2) крутящий момент на коленчатом валу, связанный через передаточную функцию с моментом сопротивления движению автомобиля;
- 3) момент инерции двигателя, который в большинстве случаев для дизеля можно оценить по моменту инерции маховика.

Скорость вращения коленчатого вала и крутящий момент дизеля являются взаимосвязанными переменными величинами и в условиях эксплуатации транспортных средств изменяются в широких пределах.

Для изучения процессов, протекающих в трансмиссии автомобиля, необходимо знать зависимость крутящего момента, развиваемого двигателем, от скорости вращения коленчатого вала, т. е. скоростную характеристику двигателя. В справочной литературе и технических характеристиках двигателей можно найти чаще всего внешнюю скоростную характеристику, т. е. зависимость крутящего момента от скорости вращения коленчатого вала при полной подаче топлива,

## Расчет и конструирование

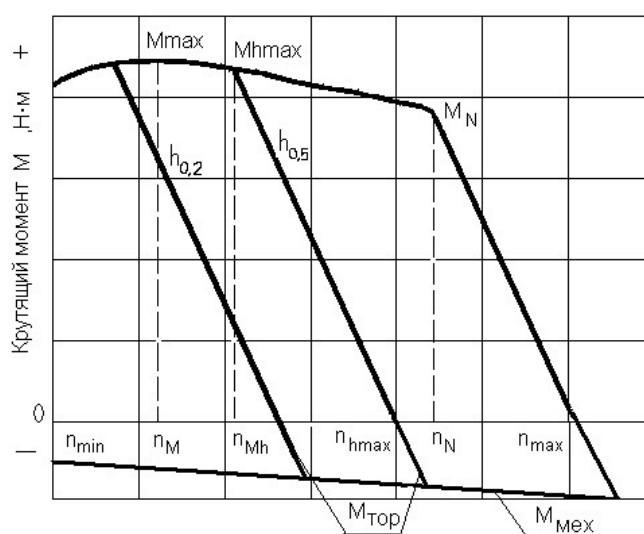
а также отдельные параметры: значения максимальной мощности и максимального крутящего момента и частот вращения коленчатого вала, соответствующих этим показателям, а также минимальную (минимальную устойчивую) частоту и максимальную частоту холостого хода при нулевой нагрузке.

Основной параметр управления дизелем – величина топливоподачи, которая изменяется органом управления всережимным регулятором – педалью подачи топлива; обозначим ее перемещение как  $H$  и будем измерять в долях от полного перемещения  $H_{\max}$ ,  $h = \frac{H}{H_{\max}}$ .

Таким образом, задачу моделирования характеристик двигателя можно свести к нахождению функции:

$$M = (n, h).$$

Названные выше параметры и типичный вид скоростных и регулировочных характеристик дизеля показаны на рисунке.



Внешняя и регулировочные характеристики дизельного двигателя ЯМЗ-236НЕ2:  
 $n$  – частота вращения коленчатого вала, об/мин

На участке от  $n_{\min}$  до  $n_N$  представлена внешняя скоростная характеристика при неизменном и полном перемещении органа управления всережимным регулятором. При уменьшении нагрузки более чем на  $n_N$  частота вращения коленчатого вала увеличивается по регулировочной характеристике от  $n_N$  до  $n_{\max}$ .

При частичных постоянных положениях органа управления всережимным регулятором имеем частичные регулировочные характеристики (перемещение педали –  $h_{0,5}$ ) и другие, поле характеристик которых заключено между внешней характеристикой и осью  $n$ , которая является скоростной характеристикой холостого хода при отсутствии внешней нагрузки на коленчатый вал: от  $n_{\min}$  (при полностью отпущенной педали управления регулятором) до  $n_{\max}$  (при полностью нажатой педали).

Известно, что из всех факторов, влияющих на изменение крутящего момента дизельного двигателя с управлением за счет количества поступающего в цилиндры топлива, наибольшее влияние оказывает величина цикловой подачи. Для эффективного сгорания топлива на режимах внешней характеристики необходимо обеспечивать допустимый минимальный, примерно одинаковый для всех скоростных режимов внешней характеристики коэффициент избытка воздуха. Следовательно, цикловая подача топлива должна быть пропорциональна коэффициенту наполнения и это обеспечивается характеристикой топливной аппаратуры при положении рейки насоса высокого давления вначале на корректоре, а затем на жестком упоре [1, с. 232–248]. Поэтому можно с известной степенью точности принять

$$M = \text{const} \cdot \eta_v. \quad (1)$$

Следовательно, для внешней характеристики изменение  $M$  определяется зависимостью коэффициента наполнения от частоты вращения коленчатого вала. Основные факторы, влияющие на коэффициент наполнения: гидравлические потери трения во впускной системе, подогрев свежего заряда, несоответствие фаз газораспределения оптимальным – определяются квадратом скорости воздушного потока во впускной системе, а скорость эта пропорциональна частоте вращения коленчатого вала. Можно поэтому считать обоснованным представление зависимости крутящего момента от скорости вращения коленчатого вала для внешней характеристики дизеля в виде отрезка квадратичной параболы. Эти допущения справедливы для диапазона частот коленчатого вала от  $n_{\min}$  до  $n_N$ :

$$M = a + b \cdot (n - n_M)^2. \quad (2)$$

Для внешней характеристики значения коэффициентов уравнения (2) найдем из условий: при частоте вращения  $n = n_M$  крутящий момент  $M = M_{\max}$  и при частоте вращения  $n = n_N$  крутящий момент  $M = M_N$ , получим:

$$\begin{aligned} a &= M_{\max}; \\ b &= \frac{M_N - M_{\max}}{(n_N - n_M)^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение крутящего момента:

$$M = M_{\max} + \frac{M_N - M_{\max}}{(n_N - n_M)^2} (n - n_M)^2. \quad (4)$$

Используя известные понятия коэффициентов приспособляемости по крутящему моменту  $k_M = \frac{M_{\max}}{M_N}$  и по частоте вращения  $k_n = \frac{n_N}{n_M}$ , получим:

$$M = M_N \left[ k_M + \frac{1 - k_M}{(k_M - 1)^2} \left( \frac{n}{n_M} - 1 \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) являются моделью работы двигателя на стационарных режимах по внешней характеристике (при полном перемещении органа управления регулятора, т. е. при  $h = 1$ ).

При работе регулятора, уменьшающего цикловую подачу топлива в интервале частот от  $n = n_N$  до  $n = n_{\max}$ , регуляторная характеристика отличается от квадратичной. Для идеального статического регулятора она должна соответствовать прямой, перпендикулярной оси частоты вращения. Реальный астатический регулятор допускает некоторое уменьшение частоты вращения коленчатого вала с увеличением нагрузки и обеспечивает линейную регуляторную характеристику в виде прямой, с наклоном в сторону уменьшения частоты вращения. При таком свойстве регулятора можно принять характеристику линейной, т. е.

$$M = M_N \cdot \frac{(n_{\max} - n)}{(n_{\max} - n_N)}. \quad (6)$$

При  $M_e = 0$  индикаторный момент  $M_{\text{инд}}$ , развиваемый рабочим процессом двигателя, равен моменту механических потерь  $M_{\text{мех}}$ , так как  $M_e = M_{\text{инд}} - M_{\text{мех}} = 0$ .

При  $n > n_{\max}$ , когда активный крутящий момент передается от трансмиссии на двигатель, а двигатель работает в тормозном режиме,  $M < 0$ , тормозной момент определяется разностью момента механических потерь  $M_{\text{мех}}$  и индикаторного момента  $M_{\text{инд}}$ . Эти режимы работы двигателя являются специфическими и требуют отдельного рассмотрения.

Частичную регуляторную характеристику также можно представить в виде уравнения (6), допустив, что все регуляторные характеристики имеют одинаковый угол наклона, но вместо  $n_{\max}$  нужно подставить максимальную частоту вращения коленчатого вала на холостом ходу  $n_{h\max}$  при заданном  $h$ :

$$M_{eh} = M_N \cdot \frac{(n_{h\max} - n)}{(n_{h\max} - n_N)}. \quad (7)$$

Величина максимального крутящего момента на регуляторной характеристике определяется моментом по внешней характеристике. Допустим, что максимальная частота вращения холостого хода по регуляторной характеристике изменяется пропорционально  $h$ :

## Расчет и конструирование

---

$$n_{h \max} = n_{\min} + (n_{\max} - n_{\min}) \cdot h. \quad (8)$$

Тогда формула регуляторных характеристик при частичном перемещении органа управления регулятором  $h$  имеет вид:

$$M_e = M_{eh} \cdot \frac{(n_{\max.xx} \cdot h - n)}{(n_{\max.xx} \cdot h - n_M)}. \quad (9)$$

### *Литература*

1. *Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина, М.С. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.*

*Поступила в редакцию 1 июня 2011 г.*

**Драгунов Геннадий Дмитриевич.** Доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – механические трансмиссии. Тел.: (351) 267-94-41; e-mail: dgd@susu.ac.ru

**Gennady D. Dragunov.** Doctor of technical sciences, professor of “Cars” department, South Ural state university. The area of scientific interests – mechanical transmissions. Tel.: (351) 267-94-41; e-mail: dgd@susu.ac.ru

**Гричанюк Максим Валерьевич.** Аспирант кафедры «Автомобили», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – автомобили, математические модели. E-mail: madom@yandex.ru

**Maxim V. Grichanyuk.** Graduate student of “Cars” department, South Ural state university. The area of scientific interests – cars, mathematical models. E-mail: madom@yandex.ru

**Якупов Олег Рифкатович.** Главный конструктор ОАО «АЗ УРАЛ», директор инженерно-конструкторского центра (г. Миасс). Область научных интересов – механика, автомобили. Тел.: (3512) 29-74-16; e-mail: yakupov@mail.uralaz.ru

**Oleg R. Yakupov.** Chief designer JSC “URAL AZ”, design engineering centre director (Miass town). The area of scientific interests – mechanics, cars. Tel.: (3512) 29-74-16; e-mail: yakupov@mail.uralaz.ru