

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ

д.т.н. Катанаев Н.Т., к.т.н. Лепёшкин А.В., Колбасов А.Ф.

Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1426, lep@mami.ru

В работе дается краткий обзор математических описаний семейства скоростных характеристик двигателей, используемых при моделировании систем «двигатель-автомобиль-водитель-среда» (ДАВС). Представлен анализ моделей, построенных на основе различных классов функций, отмечаются их преимущества и недостатки. Предлагается регрессионная модель, которая базируется на использовании функций, тесно связанных с физикой исследуемых процессов.

Ключевые слова: автомобиль, характеристики двигателя, эксперимент, классы функций, методы моделирования, адекватность моделей

В математическом описании продольного движения автомобиля важную роль играет модель двигателя [1–5]. Использование описания в виде постоянной величины, независимой от параметров движения объекта, заведомо ставит под сомнение результаты исследования, в связи с чем при описании неустановившегося продольного движения автомобиля некоторые авторы использовали различные подходы к формализации функциональных связей двигателя с параметрами движения.

Практика идентификации ДВС насчитывает многие десятилетия и неслучайно в качестве объекта на первом этапе исследований выбран достаточно старый двигатель ЗМЗ-24-01, что обосновано двумя причинами: во-первых, существует достаточно полный объем экспериментальных исследований семейства скоростных характеристик данного двигателя, во-вторых, на этом примере можно было проследить за динамикой развития моделей характеристик двигателя, крайне необходимых для описания системы ВАДС.

Попытка идентификации скоростных характеристик двигателя ЗМЗ-24-01 (рис. 1) полиномиальными функциями не привела к заметным успехам.

Хотя и для внешней характеристики с высоким коэффициентом корреляции удалось получить уравнение регрессии:

$$M_e = (12,4 + 0,004 \cdot n - 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot n^2) \cdot \beta, \\ R^2 = 0,96, \quad (1)$$

но теоретические частичные характеристики располагались достаточно далеко от соответствующих экспериментальных точек. Такое расхождение результатов можно объяснить тем, что формально выбранный класс функций не всегда дает хорошие результаты за пределами диапазона, в котором осуществляется процедура идентификации.

При подготовке модели карбюраторных двигателей автор работы [1] предполагал, что эффективная мощность формируется как результат вычитания из развиваемой двигателем мощности без учета потерь мощности механи-

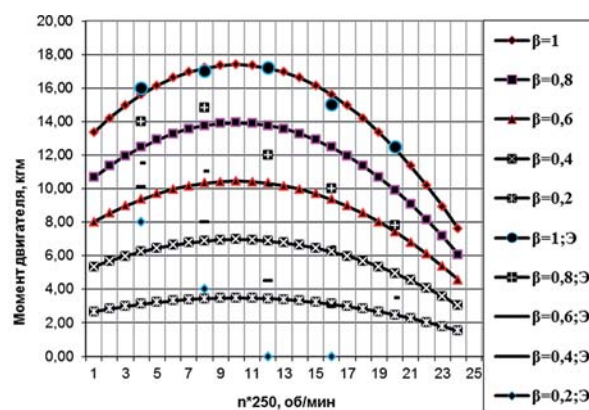


Рис. 1. Полиномиальная идентификация экспериментальных (ряды: $\beta_d = 1Э \div \beta_d = 0,2Э$) скоростных характеристик двигателя ЗМЗ-24-01 (теоретические ряды: $\beta_d = 1; \div \beta_d = 0,2$)

ческих потерь, вследствие чего была предложена модель:

$$M_e(n, \beta_d) = \beta_d M_{e0} (1 - k) (1 - e^{-n(1 - k_c + k_c / \beta_d) / T_n}) + k M_{e0} - r n (1 - k_\beta + k_\beta / \beta_d) - k_w n^2, \quad (2)$$

где M_{e0} – максимальный момент, полученный при отсутствии потерь в двигателе; k , k_c , k_w – постоянные коэффициенты; T_n – постоянная интенсивности роста момента; r – коэффициент демпфирования.

В результате обработки экспериментальных внешней и частичных характеристик двигателя ЗМЗ-24-01 в [1] удалось получить исходные данные для расчетных исследований: $M_{e0} = 32$ кГ·м; $T_n = 1481$ об/мин; $k = 0,3$; $k_c = 0,3$; $r = 0,0027$ кГ·м/мин/об; $k_\beta = 0,3$; $k_w = 4 \cdot 10^{-8}$ кГ·м·мин²/об².

Семейство расчетных и полученных в эксперименте скоростных характеристик этого двигателя в зависимости от угловой скорости ω при различных углах β_d открытия дроссельной заслонки представлены на рис. 2. Сравнение результатов показало хорошее совпадение: отклонения расчетных значений от экспериментальных не превышали 5%.

Следует заметить, что получение полного объема семейства экспериментальных скоростных характеристик двигателя обычно связано с необходимостью проведения специальных комплексных исследований неустановившихся форм движения автомобиля.

В обычной практике чаще всего предоставляется внешняя скоростная характеристика двигателя. Рассмотрим способ ее трансформации

на все семейство скоростных характеристик двигателя.

В основу регрессионной модели положим сплайн, включающий в свой состав экспоненциальную функцию, описывающую рост эффективного момента двигателя, и описание рассеяния энергии в форме полиномиальной зависимости:

$$M_e = \left[M_{e0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{n}{T_n}} \right) + M_0 \right] - r \cdot n - k_w \cdot n^2. \quad (3)$$

Внешняя скоростная характеристика, представленная (рис. 3) рядом экспериментальных точек ($\beta = 1$; Э), была идентифицирована с коэффициентом корреляции ($R^2 = 0,945$; кривая ($\beta = 1$)) при следующих коэффициентах регрессии:

$$T_n = 40 \text{ об/с}; M_{e0} = 8,4 \text{ кГ·м}; M_0 = 14,3 \text{ кГ·м}; r = 0,01 \text{ кГ·м·с/об}; k_w = 0,0013 \text{ кгмс}^2/\text{об}^2. \quad (4)$$

За основу всего семейства скоростных характеристик примем математическое описание (1), в котором для экспоненциальной и полиномиальной составляющих момента двигателя добавлен управляющий вход в форме угла β открытия дроссельной заслонки:

$$M_e = \left[M_{e0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{n}{T_n}} \right) + M_0 \right] \times \left[\beta - (1 - \beta) \cdot k_\beta \right] - (r \cdot n + k_w \cdot n^2) \times \left[1 + (1 - \beta) \cdot k_R \right]. \quad (5)$$

Коэффициенты k_β и k_R корректируют, соответственно, рост эффективного момента и рассеяние энергии в двигателе. Результаты расчета всего семейства скоростных характеристик двигателя ЗМЗ-24-01 представлены на рисунке 3.

Теперь рассмотрим возможный путь использования разработанных описаний скоростных характеристик двигателя для моделирования в условиях неполной экспериментальной информации.

Проведенные исследования доказывают возможность трансформации идентифицированного математического описания внешней скоростной характеристики на семейство частичных характеристик. Здесь важно то, что именно внешняя скоростная характеристика является одним из основных публикуемых

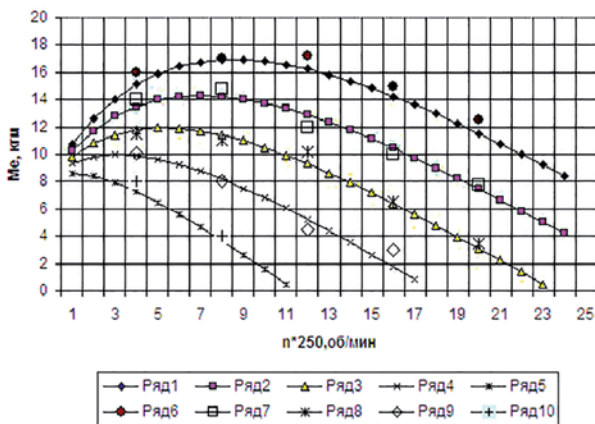


Рис. 2. Сравнение расчетных (ряды 1-5 при: $\beta_d = 1$; $\beta_d = 0,8$; $\beta_d = 0,6$; $\beta_d = 0,4$; $\beta_d = 0,2$) и экспериментальных (ряды 6–10) скоростных характеристик двигателя ЗМЗ-24-01

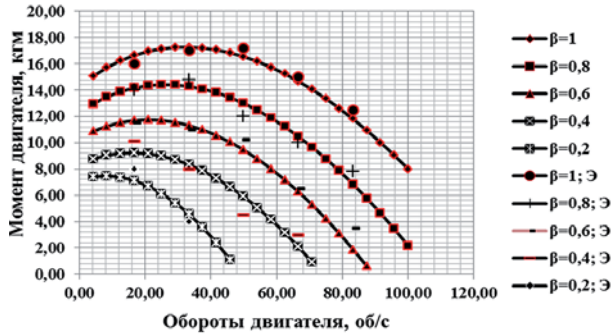


Рис. 3. Семейство экспериментальных (ряды $\beta = 1; \text{Э} \div \beta = 0,2; \text{Э}$) и теоретических (ряды: $\beta = 1; \div \beta = 0,2$) скоростных характеристик двигателя 3МЗ-24-01

технических показателей двигателя.

Модель типа (5) является достаточно эластичной и может быть использована для описания современных двигателей, однако при этом необходимо учитывать непрерывное повышение качества изготовления и рост эксплуатационных показателей. При сохранении основной структуры модели в процессе идентификации различных двигателей корректировке могут подвергаться ее параметры. Кроме того, должны быть отражены особенности преобразования управляющего входа β по экспоненциальной и полиномиальной составляющим момента в описании скоростных характеристик двигателя.

На рис. 4 представлены внешняя экспериментальная (ряд $\beta = 1; \text{Э}$) и теоретические (ряды $\beta = 1; \div \beta = 0,2$) скоростные характеристики двигателя Duratec-HE 2.0L (MI 4), модификация AODA, рассчитанные по модели:

$$M_e = \left[M_{e0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{n}{T_n}} \right) + M_0 \right] \times [\beta_0 + \beta \cdot k_3] - (r \cdot n + k_w \cdot n^2) \times [1 + (1 - \beta)^2]. \quad (6)$$

где $M_{e0} = 300 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_0 = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $T_n = 82 \text{ об/с}$; $r = 0,7 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/об}$;

$$k_w = 0,0073 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2/\text{об}^2; \beta_0 = 0,7; k_3 = 0,3. \quad (7)$$

Таким образом, анализируя полученные результаты исследований, можно сделать следующие выводы:

Уравнение (6) сравнительно легко перенастраивается под модели двигателей, рабочие

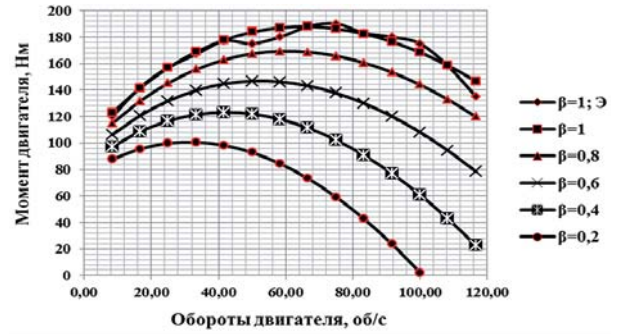


Рис. 4. Внешняя экспериментальная (ряд $\beta = 1; \text{Э}$) и теоретические (ряды $\beta = 1; \div \beta = 0,2$) скоростные характеристики двигателя Duratec-HE 2.0L (MI 4) модификация AODA

процессы которых адекватны результатам решений по математическому описанию, составленному из предложенных классов функций. В качестве исходных данных при построения семейства скоростных характеристик может быть принята внешняя характеристика двигателя.

Полученная модель по сути носит функциональный характер и может быть использована при моделировании управляемого движения человеко-машинной системы «автомобиль-среда-водитель».

Литература

1. Катанаев Н.Т. Анализ и синтез человеко-машинной системы «Автомобиль-среда-водитель»: Дисс...д-ра техн. наук. – М. 1990. – 395 с.
2. Лепешкин А.В., Курмаев Р.Х., Катанаев К.Н. Идентификация работы двигателя самоходной машины для использования в математической модели ее движения (на примере двигателя ДТ466) // Известия МГТУ «МАМИ». – 2007. – № 2(4). – С. 68–73.
3. Лепешкин А.В., Драгунов С.С., Катанаев К.Н. Моделирование процессов управления продольным движением автомобиля с помощью аналитических автоматов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2008. – № 1(5). – С. 66–72.
4. Городецкий К.И., Серебряков В.В., Мельников А.Ю. и др. Способ согласования показателей тракторных дизелей и коробок передач // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 1. – С. 28–31.
5. Горбатовский А.В., Котиев Г.О., Чулюкин А.О. Электромеханическая система для обеспечения неразрывности подведения мощности к двигателю при переключении передач в трансмиссии автомобиля // Известия МГТУ «МАМИ». – 2015. – № 3(25). – Т.1. – С. 8–16.