

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВС ДЛЯ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

А.В. Лысунец, к.т.н., доцент, В.В. Медведев ст. преподаватель
Томский государственный архитектурно-строительный университет

Предложена математическая модель двигателя внутреннего сгорания с принудительным воспламенением топлива, основанная на анализе внешней скоростной и частичных характеристик, полученных экспериментально. Модель учитывает влияние степени открытия дроссельной заслонки на развиваемую мощность в зависимости от изменяющейся внешней нагрузки. Модель рекомендуется для имитации двигателя как объекта регулирования при разработке алгоритмов и программ управления с обратной связью.

В современном двигателестроении большое внимание уделяется развитию систем управления двигателем [1]. Изделия с полной автоматизацией пользуются значительным конкурентным преимуществом на рынке. При разработке автоматических систем управления для снижения трудовых и материальных затрат на этапе проектирования необходима отработка алгоритмов управления конкретным двигателем в лабораторных условиях. Это возможно, когда существует достаточно точная и простая математическая модель, описывающая тягово-скоростные характеристики двигателя при различных углах открытия дросселя в зависимости от изменяющейся внешней нагрузки [2]. В связи с тем что физические процессы, происходящие в двигателе, чрезвычайно сложны, то и модели, описывающие эти процессы, тоже сложны. В работе предлагается модель, которая не учитывает сложные физические процессы, происходящие в ДВС, но с высокой степенью достоверности аппроксимирует его скоростные характеристики, полученные экспериментально.

Скоростные характеристики двигателя с принудительным зажиганием делят на внешние и частичные. Внешняя скоростная характеристика соответствует полному открытию дроссельной заслонки, а частичные — частичному открытию дросселя при долевых нагрузках.

Условию работы двигателя с постоянной частотой вращения соответствует равенство мощности на валу двигателя N_e и мощности сопротивления вращению ($N_e = N_{\text{нагр}}$).

Эффективная мощность, развиваемая на валу ДВС при полностью открытой дроссельной заслонке, может быть описана известной формулой Лейдермана [3], кВт:

$$N_{ei} = N_{eN} \left(a \left(\frac{n_i}{n_N} \right) + b \left(\frac{n_i}{n_N} \right)^2 - c \left(\frac{n_i}{n_N} \right)^3 \right),$$

где N_{eN} — номинальная (максимальная) мощность двигателя, кВт; a, b, c — коэффициенты, зависящие от типа и конструкции двигателя (для двигателей с принудительным искровым зажиганием можно принять равными 1 или определить по известным методикам); n_i — текущие обороты двигателя, об/мин; n_N — номинальные обороты двигателя, об/мин.

Известно, что для расчета частичные характеристик с применением формулы Лейдермана необходимо заменить значение максимальной мощности двигателя N_{eN} при полностью открытом дросселе на мощность, развиваемую при дросселе, открытом на угол α . Номинальные обороты n_N заменить на обороты, соответствующие мощности при значении угла открытия дросселя α . Обозначив мощность при угле α как N_{eNi} , а обороты, соответствующие этой мощности — n_{Ni} , получим зависимость эффективной мощности от оборотов при открытии дроссельной заслонки на угол α :

$$N_{ei} = N_{eNi} \left(a \left(\frac{n_i}{n_{Ni}} \right) + b \left(\frac{n_i}{n_{Ni}} \right)^2 - c \left(\frac{n_i}{n_{Ni}} \right)^3 \right). \quad (1)$$

Для определения N_{eNi} и n_{Ni} рассмотрим параметры, влияющие на номинальную мощность и обороты ДВС с принудительным искровым зажиганием. Известна формула для определения максимальной мощности двигателя исходя из его конструктивных параметров [3]

$$N_{eN} = \frac{V_d \cdot n_N \cdot H_u}{30 \cdot \tau \cdot \alpha_\beta \cdot l_0} \cdot \rho_k \cdot \eta_v \cdot \eta_i \cdot \eta_m,$$

где V_d — литраж двигателя, л; n_N — номинальное число оборотов коленчатого вала, об/мин; H_u — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг; τ —

тактность двигателя; α_b — коэффициент избытка воздуха; l_0 — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг; ρ_k — плотность заряда на впуске, кг/м³; η_v — коэффициент наполнения; η_i — индикаторный КПД; η_m — механический КПД. В ДВС с принудительным искровым зажиганием самым распространенным способом регулирования мощности является количественное регулирование, т. е. изменение количества подаваемой смеси. При этом мощность двигателя прямо пропорциональна коэффициенту наполнения η_v , т. е. количеству подаваемой горючей смеси. В свою очередь, количество подаваемой горючей смеси, очевидно, будет зависеть от площади проходного сечения дроссельной заслонки.

Рассмотрим зависимость изменения площади проходного сечения от угла открытия дроссельной заслонки (рис. 1). Дроссельная заслонка представляет собой круглый диск 2 установленный в патрубке 1 круглого сечения внутренним диаметром d_r . Для упрощения расчетов сделаем допущение, что диаметр дроссельной заслонки равен d_r и при полном ее закрытии угол $\alpha = 0$. Таким образом, при открытии заслонки проекция ее на плоскость, перпендикулярную патрубку, представляет собой эллипс, который сужается по мере открытия заслонки, а площадь открывающегося щелевого отверстия $S_{щ}$ можно определить как разность площадей патрубка и эллипса. Обозначим площадь патрубка S_r площадь эллипса $S_э$, постоянную полуось эллипса $a_э$, а меньшую — изменяющуюся $b_э$, получим

$$S_{щ} = \pi \cdot \frac{d_r^2}{4} - \pi \cdot a_э \cdot b_э.$$

Запишем площадь эллипса через угол поворота дроссельной заслонки, представив меньшую изменяющуюся ось эллипса как косинус угла α

$$\cos(\alpha) = \frac{2 \cdot b_э}{d_r},$$

где $b_э$ — полуось эллипса, определяемая проекцией заслонки на плоскость перпендикуляр-

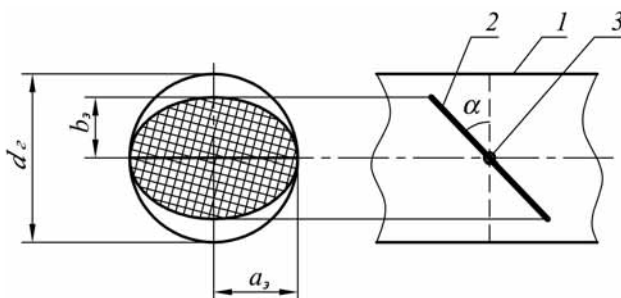


Рис. 1. Схема дроссельной заслонки:

1 — впускной трубопровод; 2 — дроссельная заслонка; 3 — ось дроссельной заслонки

ную оси патрубка. Тогда площадь щелевого отверстия, равна

$$S_{щ} = \pi \cdot \frac{d_r^2}{4} (1 - \cos(\alpha)).$$

В данной формуле не учитывается толщина дроссельной заслонки. Допуская, что коэффициент наполнения, влияющий на максимальную мощность двигателя, изменяется пропорционально изменению площади щелевого отверстия и пренебрегая изменением индикаторного КПД η_i , получим значение мощности N_{eNi} , соответствующее углу открытия заслонки α :

$$N_{eNi} = N_{eN} (1 - \cos(\alpha)). \quad (2)$$

Определение оборотов двигателя, соответствующих значению мощности при частично открытой дроссельной заслонке, — затруднено, однако, анализируя экспериментальные данные испытаний двигателя на частичных нагрузках [2], можно сделать вывод, что изменение оборотов, соответствующих значению мощности, при частично открытой дроссельной заслонке удовлетворительно аппроксимируется уравнением

$$n_{Ni} = n_N \cdot \sin(\alpha). \quad (3)$$

Результаты расчета частичных скоростных характеристик по формулам (1)–(3) для двигателя УМЗ-421 номинальной мощностью 72,1 и номинальными оборотами 4000 об/мин представлены на рис. 2.

Формулы (1)–(3) позволяют вычислить мощность двигателя при различных углах поворота дроссельной заслонки, а при известной внешней нагрузке, например, при использовании двигателя для привода электрогенератора [1], подобрать угол положения дроссельной заслонки, который обеспечивает заданные обороты и равномерную частоту вращения.

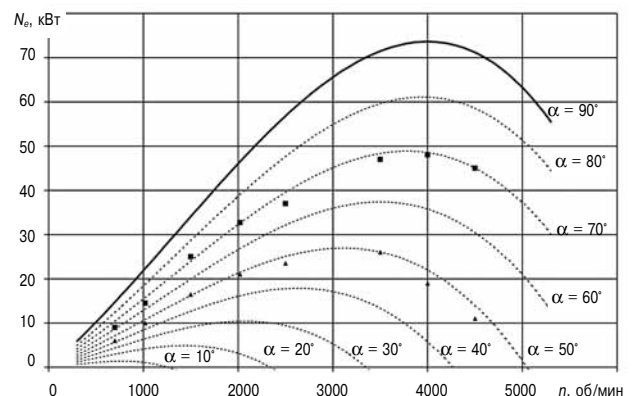


Рис. 2. Скоростные характеристики двигателя УМЗ-421 при различных углах открытия дроссельной заслонки:

■ — экспериментальные данные при угле открытия 70°; ▲ — экспериментальные данные при угле открытия 50°; - - - - расчетные кривые частичных характеристик; — расчетная кривая внешней скоростной характеристики

При использовании цифровых контроллеров с обратной связью для автоматизации управления работой двигателя применяются датчики и управляющие устройства, опрос датчиков двигателя производится через определенный интервал времени Δt . В этом случае становится актуальной задача определения изменения оборотов за этот промежуток времени с учетом воздействия внешних факторов. Причиной изменения оборотов двигателя является разность мощности, развиваемой двигателем, и мощности внешней нагрузки. Например, при уменьшении внешней нагрузки и неизменном положении дроссельной заслонки избыточная мощность на валу стремится разогнать двигатель $N_{изб} = N_e - N_{нагр} > 0$.

Очевидно, что вся избыточная мощность будет затрачена на разгон коленчатого вала двигателя, т. е. на преодоление момента от сил инерции, который можно определить по уравнению

$$M_z = I_z \cdot \varepsilon,$$

где I_z — момент инерции подвижных элементов, кг·м²; ε — ускорение коленчатого вала, м/с². Тогда, полагая, что вся избыточная мощность затрачивается на преодоление момента от сил инерции

$$N_{изб} = I_z \cdot \varepsilon \cdot \omega_z,$$

где ω_z — угловая скорость коленчатого вала, рад/с.

Отсюда угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{N_{изб}}{I_z \cdot \omega_z}.$$

Представим ускорение как изменение скорости за время Δt :

$$\Delta\omega = \frac{N_{изб} \cdot \Delta t}{I_z \cdot \omega_z}. \quad (4)$$

С помощью формулы (4) можно определить изменение числа оборотов за время Δt . При ее использовании необходимо учитывать, что если двигатель применяется в приводе каких-либо агрегатов, то момент инерции I_z представляет собой

$$I_z = I_{z_{дв}} + I_{z1} + I_{z2} + I_{zi} + \dots,$$

где $I_{z_{дв}}$ — момент инерции ДВС, кг м²; I_{z1} , I_{z2} , I_{zi} — моменты инерции подвижных элементов, соединенных с двигателем, кг м².

Таким образом, выражения (1)–(4) можно использовать при проектировании различных

электронных регулирующих устройств, например автоматического поддержания постоянной скорости движения автомобиля или автоматического поддержания постоянных оборотов двигателя в приводе электрогенератора.

Предлагаемая методика не учитывает переходные процессы, возникающие при движении дроссельной заслонки. Расчет производится только для какого-то ее фиксированного положения. При отличии мощности, развиваемой на валу двигателя, и мощности нагрузки — модель учитывает изменение оборотов двигателя за заданный интервал Δt . Расчеты, проведенные с помощью предлагаемой модели, вследствие применения полиномиальных зависимостей могут отличаться от экспериментальных данных, полученных на других двигателях, но, тем не менее, выражения достаточно точно описывают реакцию двигателя на изменение внешней нагрузки и могут быть рекомендованы для отработки программ управления ДВС с принудительным зажиганием. Также следует учесть, что формула (1) имеет граничные условия. Так, ее нельзя применять при $n_i < 700$ об/мин, поэтому для запуска ДВС и вывода его в рабочий режим в математической модели придется использовать звено, имитирующее работу стартера, которое будет разгонять ДВС до скорости $n_i < 700$ об/мин.

Работоспособность модели была проверена в Microsoft Visual Basic for Applications и применялась для решения ряда задач [1], связанных с автоматическим регулированием двигателя.

Литература

1. Скок А.К., Медведев В.В., Лысунец А.В. Генераторный газ как топливо для машин и комплексов строительной отрасли // Материалы I Международной научной конференции студентов и молодых ученых [Электрон. текстовые дан.]. — Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. — 667 с.
2. Войтенко В.А. Математическое моделирование скоростных характеристик двигателя внутреннего сгорания // Электротехнические и компьютерные системы. — 2013. — № 09 (85). — С. 45–49.
3. Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания: В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник для вузов / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др.; под ред. В.Н. Луканина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 2005. — 479 с.