

УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

К.Б. Алексеев, А.А. Малявин



АЛЕКСЕЕВ
Кир
Борисович

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, информатика и системы управления» Московского государственного индустриального университета (МГИУ). Специалист в области автоматического управления и автоматизации. Автор более 100 научных трудов и изобретений.

Введение

Возросшие требования, предъявляемые к двигателям внутреннего сгорания (ДВС), привели к широкому внедрению электронных автоматических систем управления, к числу которых можно отнести систему управления мощностью и, следовательно, скоростью вращения коленчатого вала двигателя.

Двигатель внутреннего сгорания не является стационарным объектом хотя бы потому, что при неизменном положении дроссельной заслонки скорость вращения коленчатого вала двигателя будет меняться в зависимости от температуры и давления окружающего возду-

ха. Данное обстоятельство усложняет задачу управления мощностью двигателя, которая в настоящее время может решаться несколькими способами [1]: путем изменения количества подаваемой топливовоздушной смеси, ее состава, а также за счет изменения угла опережения зажигания.

Сравнение этих способов показывает, что наиболее рациональным является первый, при котором осуществляется управление положением дроссельной заслонки, а подсистема подачи топлива обеспечивает неизменный (стехиометрический, при работе в номинальном режиме) состав топливовоздушной смеси.



МАЛЯВИН
Александр
Анатолевич

Аспирант МГИУ, инженер-программист Центра информационных технологий (ЦИТ) АМО ЗИЛ. Специализируется в области систем автоматического управления.

Что касается управления углом опережения зажигания, то надо отметить, что его отклонение от значения, установленного подсистемой управления зажиганием, приводит к менее эффективному использованию энергии, выделяемой при сгорании, т.е. к увеличенному расходу топлива.

Используемое для этого и практикуемое в ряде случаев частичное отключение цилиндров, нежелательно, особенно при работе в режимах высокой мощности, поскольку увеличение неравномерности нагрузки на детали двигателя и трансмиссии, вызванное отключением топливоподачи, приводит к сокращению срока службы и возможности преждевременной поломки двигателя.

Постановка задачи

Вследствие указанных причин наиболее распространенным способом управления мощностью двигателя и, следовательно, скоростью автомобиля является управление положением дроссельной заслонки. В рамках данного способа существует несколько методов построения системы управления. Наибольшее распространение получил классический метод, основанный на принципах пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулирования. Наряду с этим используются и другие способы, например, основанные на принципах адаптивного управления.

Однако, обеспечивая высокое качество управления, ПИД регулятор может не удовлетворять предъявляемым требованиям в условиях сильных возмущений. Адаптивные системы управления, в свою очередь, не получили широкого распространения из-за необходимости наличия адекватной эталонной модели и знания предыстории состояния ДВС, необходимой для идентификации этой модели.

Предлагаемая авторами система управления скоростью вращения коленчатого вала двигателя путем изменения положения дроссельной заслонки, базирующаяся на нечеткой логике, может позволить получить решение данной проблемы, а именно:

- обеспечить экономию топлива, поскольку в традиционных системах, где педаль акселератора механически связана с дроссельной заслонкой, подсистема управления топливоподачей реагирует на изменение потока воздуха уже после того, как оно произойдет [2]; кроме этого, дополнительный эффект экономии достигается за счет отсутствия резких изменений положения дроссельной заслонки;
- обеспечить плавное изменение крутящего момента и тем самым увеличить срок службы механических деталей двигателя и трансмиссии;
- облегчить управление автомобилем при движении по трассе, поскольку задачу поддержания скорости система управления берет на себя;
- решить проблему остановки двигателя, если положение педали акселератора окажется несоответствующим текущей нагрузке на двигатель;
- упростить управление двигателем, поскольку в предлагаемой системе отсутствуют алгоритмы идентификации модели, требующие знания предыстории измерений и больших вычислительных затрат.

Описание модели рабочих процессов двигателя

Математической модели, в точности описывающей реальные процессы, происходящие в двигателе внутреннего сгорания, не существует. Поэтому при технических расчетах и исследованиях рабочих процессов в двигателе используются приближенные модели, построенные с использованием классической механики и теории открытых термодинамических систем [3–6].

В данной работе использовалась математическая модель V-образного 8-цилиндрового двигателя ЗиЛ 508, все необходимые параметры которой заимствованы из работы [6]. Объем впускного коллектора V_k был принят равным удвоенному полному рабочему объему двигателя.

Ограничимся рассмотрением процессов, происходящих только в цилиндрах двигателя и

во впускном коллекторе. Для описания рабочих процессов, протекающих непосредственно в двигателе внутреннего сгорания, запишем систему уравнений такого вида [6]:

$$\begin{cases} \frac{dp_l}{dt} = \frac{k_l - 1}{V_l} \cdot \left(\frac{dQ_l}{dt} + \sum_{i=1}^{n_1} h_{вп(i)l} \cdot G_{вп(i)l} - h_l \cdot \sum_{j=1}^{n_2} G_{вып(j)l} - \frac{k_l}{k_l - 1} \cdot p_l \cdot \frac{dV_l}{dt} \right) \\ \frac{dm_l}{dt} = \sum_{i=1}^{n_1} G_{вп(i)l} - \sum_{j=1}^{n_2} G_{вып(j)l} \\ \frac{dg_{1l}}{dt} = \frac{1}{m_l} \cdot \left(\frac{dm_{1l}}{dt} - g_{тцл} \cdot (1 + \alpha \cdot l_0) \cdot \frac{dx_l}{dt} - g_{1l} \cdot \frac{dm_l}{dt} \right) \\ \frac{dg_{2l}}{dt} = \frac{1}{m_l} \cdot \left(\frac{dm_{2l}}{dt} + g_{тцл} \cdot (1 + \alpha \cdot l_0) \cdot \frac{dx_l}{dt} - g_{2l} \cdot \frac{dm_l}{dt} \right) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{F_p \cdot R \cdot \sum_{l=1}^N p'(\varphi)_l \cdot (p_l - p_{0l} + p_{мпл}) - M_n - R^2 \cdot \omega^2 \cdot S_l}{I_k + R^2 \cdot S_2} \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega \end{cases}, \quad (1)$$

где p_l – давление в l -м цилиндре двигателя; k_l – постоянная адиабаты рабочего тела; V_l – текущий объем цилиндра двигателя; Q_l – суммарное количество теплоты, подведенное к рабочему телу; $h_{вп(i)l}$ – энтальпия топливовоздушной смеси, поступающей через i -й впускной канал вместе с потоком $G_{вп(i)l}$; h_l – энтальпия отработавших газов, выходящих из цилиндра двигателя через j -й выпускной канал вместе с потоком $G_{вып(j)l}$; n_1, n_2 – количество впускных и выпускных каналов на один цилиндр; m_l – масса рабочего тела, находящегося в цилиндре двигателя; g_{1l}, g_{2l} – массовые доли свежего заряда и продуктов сгорания в цилиндре двигателя; m_{1l}, m_{2l} – масса свежего заряда и продуктов сгорания соответственно; $g_{тцл}$ – цикловой расход топлива; α – коэффициент избытка воздуха; l_0 – масса воздуха, необходимая для полного сгорания топлива; x_l – доля выгоревшего топлива; ω – скорость вращения коленчатого вала двигателя; F_p – площадь днища поршня; $p'(\varphi)_l$ – передаточный коэффициент для приведения скорости вращения вала двигателя к скорости перемещения поршня; p_{0l} – давление в карте двигателя; $p_{мпл}$ – условное давление механических потерь в двигателе; M_n – момент нагрузки, приложенный к коленчатому валу двигателя; R – радиус кривошипа; S_l – частная производная кинетической энергии кривошипно-

шатунного механизма по обобщенной координате φ ; S_2 – суммарная масса деталей, участвующих во вращательном движении, приведенная к коленчатому валу двигателя; I_k – момент

инерции коленчатого вала двигателя; φ – угол положения коленчатого вала двигателя.

Здесь первые два уравнения, описывающие газодинамические процессы в цилиндрах двигателя, получены на основании законов сохранения энергии и массы открытой термодинамической системы. Последующие два уравнения описывают изменение массовых долей свежего заряда и продуктов сгорания в процессах сгорания и газообмена. Наконец, последние два уравнения, полученные на основании уравнений Лагранжа второго рода, описывают движение кривошипно-шатунного механизма.

Аналогичная система уравнений может быть записана и для процессов, протекающих во впускном коллекторе двигателя внутреннего сгорания:

$$\begin{cases} \frac{dp_k}{dt} = \frac{k_k - 1}{V_k} \cdot \left(h_b \cdot G_b - h_k \cdot \sum_{i=1}^N G_{k(i)} \right) \\ \frac{dm_k}{dt} = G_b - \sum_{i=1}^N G_{k(i)} \\ \frac{dg_{11}}{dt} = \frac{1}{m_k} \cdot \left(\frac{dm_{11}}{dt} - g_{11} \cdot \frac{dm_k}{dt} \right) \\ \frac{dg_{12}}{dt} = \frac{1}{m_k} \cdot \left(\frac{dm_{12}}{dt} - g_{12} \cdot \frac{dm_k}{dt} \right) \end{cases}, \quad (2)$$

где p_k – давление во впускном коллекторе; k_k – постоянная адиабаты газовой смеси во

впускном коллекторе; h_b – энтальпия воздуха и отработавших газов (при обратном забросе), поступающих во впускной коллектор двигателя вместе с потоком воздуха G_b , проходящего через дроссельную заслонку; h_k – энтальпия газовой смеси, покидающей впускной коллектор через впускные органы газораспределительной системы двигателя в месте с потоком каждого i -го впускного клапана; N – общее количество впускных клапанов двигателя; m_k – масса газовой смеси, находящейся во впускном коллекторе; g_{11} , g_{12} – массовые доли воздуха и продуктов сгорания, находящихся во впускном коллекторе, соответственно; m_{11} , m_{12} – масса воздуха и продуктов сгорания, находящихся во впускном коллекторе, соответственно.

Данные системы уравнений представляют собой формулировку задачи Коши и разрешаются относительно скорости ω методами численного интегрирования при следующих начальных условиях:

$$\begin{cases} p_i(0) = p_i^0 \\ m_i(0) = m_i^0 \\ g_{1i}(0) = g_{1i}^0 \\ g_{2i}(0) = g_{2i}^0 \\ \omega(0) = \omega^0 \\ \varphi(0) = \varphi^0 \end{cases} \begin{cases} p_k(0) = p_k^0 \\ m_k(0) = m_k^0 \\ g_{11}(0) = g_{11}^0 \\ g_{12}(0) = g_{12}^0 \end{cases} \quad (3)$$

Однако решение этих систем уравнений только приближенно характеризует изменение скорости и не дает никаких рекомендаций по управлению. Это обусловлено тем, что двигатель внутреннего сгорания является сложным нелинейным объектом управления, состояние которого зависит от множества как внешних факторов (момент нагрузки на валу, давление, температура и влажность атмосферы и пр.), так и внутренних факторов (физические и химические свойства топлива и их однородность, степень неидентичности рабочих процессов, качество смазки деталей двигателя и пр.), многие из которых с трудом поддаются измерению даже в лабораторных условиях. В случае же нормальной работы двигателя это просто невозможно, поскольку требует установки мас-

сивной и дорогостоящей измерительной и сопутствующей аппаратуры.

Система управления

Решение задачи управления ДВС методами линейной теории автоматического управления в соответствии с приведенной математической моделью возможно только при наличии небольших возмущений. Но для двигателя, работающего в реальных условиях, допущение о малости возмущений некорректно.

Поэтому использование ПИД регулятора для управления ДВС требует его постоянной подстройки, которая отличается трудоемкостью и большими временными затратами [7].

Тем не менее, человеку, не обладающему специальными знаниями, удастся управлять работой двигателя и всего автомобиля в целом, следуя только цепочке логических заключений типа «если скорость уменьшается, нужно прибавить газ». Не используя точных вычислений, ему удастся естественным образом достигнуть устойчивой работы двигателя относительно разного рода возмущений.

Нечеткие системы управления позволяют скопировать такое поведение, используя лингвистические оценки управляемых параметров и правила управления, имитирующие человеческое мышление, которые могут быть использованы при проектировании системы управления. При этом отпадает необходимость в анализе сложной системы уравнений и появляется возможность реализовать управление в различных режимах работы, не прибегая к выделению отдельных контуров управления [8, 9].

Функциональная схема системы управления скоростью вращения ДВС на базе нечеткой логики представлена на рис. 1.

Основными блоками такой системы являются микроконтроллер совместно с устройствами аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователя, реализующий работу нечеткого регулятора; объект управления ДВС и электронно-управляемый привод дроссельной заслонки; датчик положения коленчатого вала двигателя.

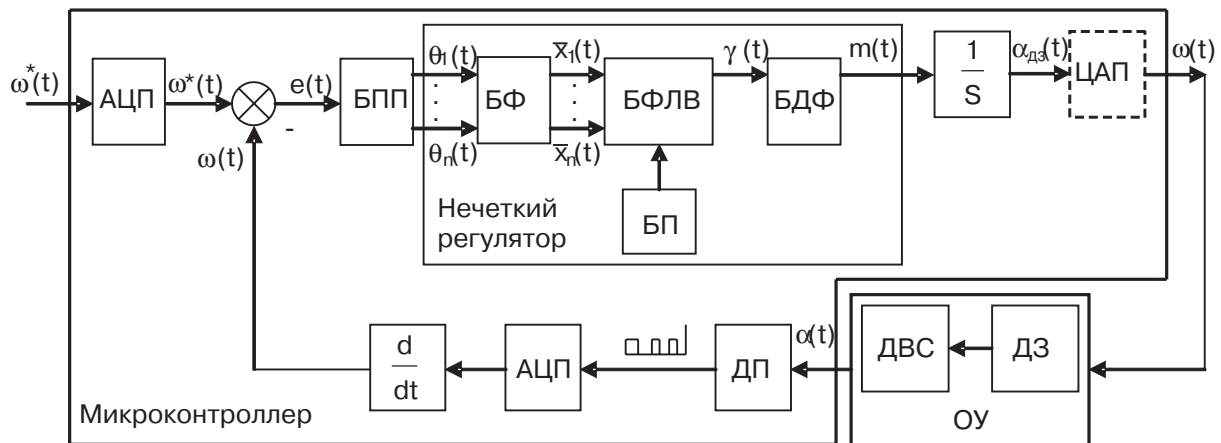


Рис. 1. Функциональная схема нечеткой системы управления:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БПП – блок подготовки параметров;

БФ – блок фаззификации; БФЛВ – блок формирования логического вывода; БП – база правил;

БДФ – блок дефаззификации; $\frac{1}{s}$ – интегратор; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ОУ – объект управления; ДЗ – дроссельная заслонка; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; ДП – датчик положения;

$\frac{d}{dt}$ – дифференциатор

Работа системы происходит следующим образом: задающий сигнал $\omega^*(t)$, преобразованный с помощью АЦП, сравнивается с сигналом о текущей скорости вращения коленчатого вала двигателя $\omega(t)$, полученным на основе показаний датчика положения $\alpha(t)$ (посредством дифференцирования $\frac{d}{dt}$). Полученная ошибка регулирования $e(t)$ используется блоком подготовки параметров, который на основании единственного сигнала ошибки производит формирование вектора входных параметров $[\theta_1(t), \dots, \theta_n(t)]$ нечеткого регулятора.

Отметим, что в классе линейных замкнутых систем автоматического управления этот вектор параметров преобразовывался бы в соответствии с общепринятой для этих систем процедурой. Но поскольку, в силу указанных выше причин, возможности определения передаточной функции для подобного преобразования нет, дальнейшая обработка происходит с помощью аппарата нечеткой логики, т.е. посредством нечеткого регулятора.

Нечеткий регулятор состоит из четырех элементов [8, 10]: блока фаззификации (БФ), блока формирования логического вывода (БФЛВ), базы правил (БП) и блока дефаззификации (БДФ).

Вектор входных параметров $[\theta_1(t), \dots, \theta_n(t)]$, подаваемый на вход нечеткого регулятора, представляет набор четких значений, например, производных от ошибки, который преобразуется посредством блока фаззификации к своему нечеткому аналогу $[\bar{x}_1(t), \dots, \bar{x}_n(t)]$. На этом этапе происходит определение функций принадлежности каждого входного параметра каждому нечеткому терму (см. далее рис. 5), а результат подается на блок формирования логического вывода.

Блок формирования логического вывода на основе вектора нечетких входных параметров, каждый из которых описывается несколькими функциями принадлежности (по числу термов), производит вычисление нечеткого управляющего воздействия $\gamma(t)$.

Полученное нечеткое управляющее воздействие посредством блока дефаззификации приводится к четкому значению $m(t)$, которое подается на вход интегратора $\frac{1}{s}$, осуществляющего расчет заданного положения дроссельной заслонки $\alpha_{дз}(t)$ степени ее открытия от 0 (полностью закрыта) до 1 (полностью открыта). Далее (непосредственно или после цифроаналогового преобразования в зависимости от особенностей конкретной системы управ-

ления) подается на электронно-управляемый привод дроссельной заслонки.

Нечеткий регулятор реализуется программно и работает в дискретном режиме так, что на каждом шаге квантования он производит все необходимые вычисления.

Применительно к рассматриваемому объекту установим период дискретизации равным 10 мс. Пусть в качестве датчика скорости вращения используется диск с нанесенными на него 60-2 зубьями, а в качестве информации о скорости вращения используется осредненная скорость вращения коленчатого вала двигателя за 90 градусов угла поворота:

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n+1} \text{ при } n=15, \quad (4)$$

где n – длина окна осреднения.

В качестве входных переменных выберем ошибку регулирования, первую и вторую производные от ошибки $[\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t)]$. Это соответствует построению обычного ПИД регулятора с той разницей, что коэффициенты усиления такого регулятора будут нелинейными функциями. Таким образом:

$$\begin{cases} \theta_1(t_k) = e(t_k) \\ \theta_2(t_k) = (\theta_1(t_k) - \theta_1(t_{k-1})) / h \\ \theta_3(t_k) = (\theta_2(t_k) - \theta_2(t_{k-1})) / h, \end{cases} \quad (5)$$

где h – период дискретизации.

Каждой из нечетких входных переменных поставим в соответствие три термина: отрицательный, нулевой, положительный — $\{O, H, P\}$. В качестве выходной переменной выберем скорость открытия/закрытия дроссельной заслонки. Поставим ей в соответствие нечеткую переменную, имеющую семь термов: отрицательный, отрицательный средний, отрицательный малый, нулевой, положительный малый, положительный средний, положительный — $\{O, OC, OM, H, PM, PS, P\}$.

После дефаззификации выходной переменной путем интегрирования вычисляется текущее положение дроссельной заслонки, которое подается на вход апериодического звена, описывающего привод дроссельной заслонки. Постоянную времени апериодического звена вычислим в пред-

положении, что время отработки входного воздействия равно 100 мс (времени отклика при изменении положения дроссельной заслонки от полностью закрытого до полностью открытого состояния).

Пусть за время 100 мс точность отработки входного воздействия приводом дроссельной заслонки составляет 0,5 %, тогда

$$T = -\frac{0,1}{\ln(1-0,995)} \approx 0,02 \text{ с}. \quad (6)$$

Пусть каждый терм описывается треугольной функцией принадлежности на универсальном множестве $[0, L-1]$, где L – количество термов, описывающих нечеткую переменную. Тогда каждая функция принадлежности $\mu(\theta)$ (рис. 2) будет описываться уравнением:

$$\mu(\theta) = \max \left(\min \left(\frac{\theta - a}{b - a}, \frac{c - \theta}{c - b} \right), 0 \right). \quad (7)$$

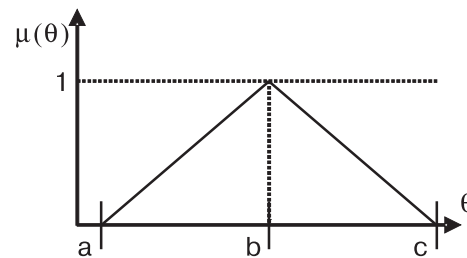


Рис. 2. Треугольная функция принадлежности

При этом каждая входная переменная $[\theta(t), \theta_2(t), \theta_3(t)]$ отображается на универсальное множество $[0, L-1]$ посредством масштабирования [10]:

$$u_i = \frac{(\theta_i - \theta_{ni}) \cdot (u_B - u_H)}{\theta_{bi} - \theta_{ni}} + u_H, \quad (8)$$

где θ_i – входная величина, подаваемая на вход регулятора; θ_{bi}, θ_{ni} – ее верхний и нижний пределы; u_i – величина, полученная в результате масштабирования; u_B, u_H – пределы этой величины.

Отсюда, можно записать:

$$\begin{cases} u_1 = \frac{(\theta_1 - \theta_{n1}) \cdot (u_B - u_H)}{\theta_{b1} - \theta_{n1}} \\ u_2 = \frac{(\theta_2 - \theta_{n2}) \cdot (u_B - u_H)}{\theta_{b2} - \theta_{n2}} \\ u_3 = \frac{(\theta_3 - \theta_{n3}) \cdot (u_B - u_H)}{\theta_{b3} - \theta_{n3}}. \end{cases} \quad (9)$$

Тогда функции принадлежности для каждой из выбранных входных переменных могут быть представлены в виде графиков (рис. 3).

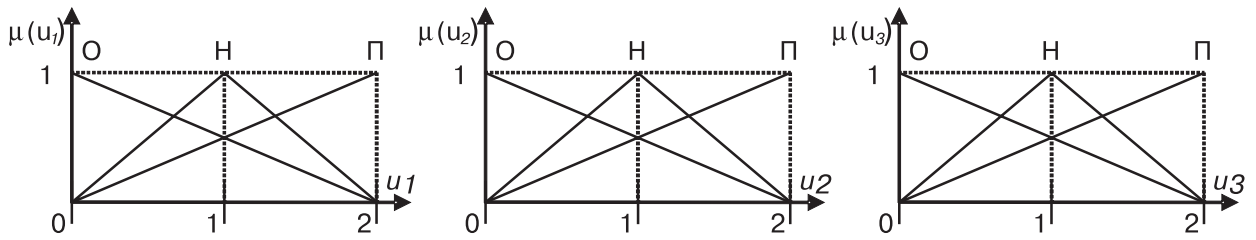


Рис. 3. Термы входных переменных нечеткого регулятора

Значение управляющего воздействия (представлено термами на рис. 4), получаемое на выходе нечеткого регулятора, восстанавливается посредством обратного преобразования:

$$m_i = m_{\min} + (m_{\max} - m_{\min}) \cdot u_i \quad \text{или} \quad m = m_{\min} + (m_{\max} - m_{\min}) \cdot u_4. \quad (10)$$

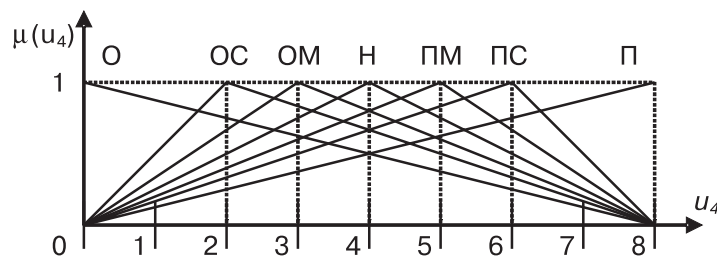


Рис. 4. Термы управляющего воздействия

Таким образом, настройка регулятора сводится к выбору диапазонов входных переменных и управляющего воздействия, а также к выбору параметров a, b, c каждой функции принадлежности.

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_1 [\theta_1^{\min}, \theta_1^{\max}] \\ \Delta\theta_2 [\theta_2^{\min}, \theta_2^{\max}] \\ \Delta\theta_3 [\theta_3^{\min}, \theta_3^{\max}] \\ \Delta m [m_{\min}, m_{\max}] \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Процедура нечеткого вывода

Пусть $\mu^{j_{in}}(u_i)$ — функция принадлежности входного параметра u_i , $i = \overline{1,3}$ нечеткому терму $a_i^{j_{in}}$, $j_{in} = \{O, H, П\}$ (рис. 5). Тогда $m^{j_{out}}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ — функция принадлежности вектора входных параметров управляющему воздействию $m_{j_{out}}$, $m_{j_{out}}$, где $j_{out} = \{O, OC, OM, H, ПМ, ПС, П\}$ определяется из системы нечетких логических уравнений:

$$m_i = m_{\min} + (m_{\max} - m_{\min}) \cdot u_i \quad \text{или} \quad m = m_{\min} + (m_{\max} - m_{\min}) \cdot u_4. \quad (12)$$

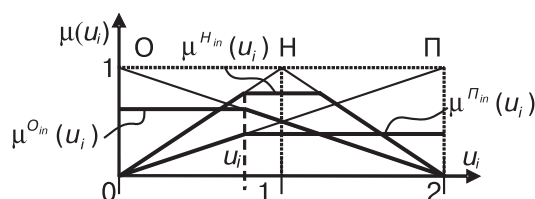


Рис. 5. Функции принадлежности входного параметра u_i нечетким термам $\{O, H, П\}$

Отсюда результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия имеет вид:

$$\mu^m(u_1, u_2, u_3) = \mu^{m_0}(u_1, u_2, u_3) \vee \mu^{m_{bc}}(u_1, u_2, u_3) \vee \mu^{m_{bm}}(u_1, u_2, u_3) \vee \mu^{m_n}(u_1, u_2, u_3) \vee \mu^{m_{nm}}(u_1, u_2, u_3) \vee \mu^{m_{nc}}(u_1, u_2, u_3) \vee \mu^{m_n}(u_1, u_2, u_3). \quad (13)$$

В качестве схемы нечеткого вывода была использована схема нечеткого вывода Мамдани: в качестве операции импликации используется функция $\min$, в качестве операции агрегирования – $\max$, а дефазификация производится методом центра тяжести:

$$U_c = \frac{\int_{u_1}^{u_2} u \cdot \mu^m du}{\int_{u_1}^{u_2} \mu^m du}, \quad (14)$$

где μ^m – результирующая функция принадлежности управляющего воздействия; u_1, u_2 – крайние значения множества возможных значений управляющего воздействия u .

Сформулируем и запишем следующие правила управления:

$\theta_3 = O$				$\theta_3 = H$				$\theta_3 = П$			
$\theta_2 \backslash \theta_1$	O	H	П	$\theta_2 \backslash \theta_1$	O	H	П	$\theta_2 \backslash \theta_1$	O	H	П
O	O			O	OC	OC		O	OM		
H		OC		H	OM	H	ПМ	H		ПC	
П			ПМ	П		ПC	ПC	П			П

Подстройка параметров и моделирование системы управления

Процесс моделирования работы системы «двигатель-регулятор» целесообразно производить в два этапа: на первом – моделирование запуска двигателя и вывод его на начальный режим работы, в качестве которого был выбран режим холостого хода (таким образом, определяются начальные условия для последующего моделирования), на втором – подключается регулятор скорости двигателя и производится моделирование работы всей системы. Для упрощения настройка оборотов холостого хода производилась регулированием минимального угла открытия дроссельной заслонки и скорость была установлена равной 821 об/мин или 86 c^{-1} .

Поскольку настройки масштабирования скорости изменения ошибки напрямую влияют на максимальное ускорение, введем в схему регулятора соответствующий блок настройки параметров.

Выберем в качестве идеального переход-

ного процесса экспоненциальный. Тогда можно записать:

$$\dot{\omega}(t) = \frac{\omega^* - \omega(t)}{c_T} = \frac{\theta_1}{c_T}, \quad (15)$$

где c_T – постоянная времени экспоненциального переходного процесса; ω^* – желаемая скорость; $\omega(t)$ – действительная скорость.

Таким образом, блок настройки изменения параметров масштабирования скорости изменения ошибки с учетом введенного ограничения нижней границы изменения будет выглядеть следующим образом (рис. 6):

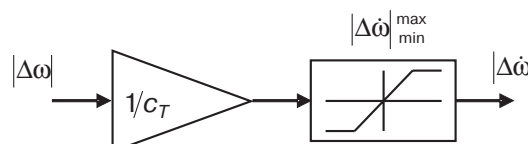


Рис. 6. Блок настройки масштабирования скорости изменения ошибки

Качество работы и быстродействие регулятора зависит от диапазона максимального изменения управляющего воздействия. Для того, чтобы обеспечить баланс между быстродействием и качеством, введем блок настройки параметров масштабирования управляющего воздействия в зависимости от текущей ошибки (рис. 7). В качестве закона изменения рабочего диапазона регулятора используем экспоненциальный:

$$m = m_{\min} \cdot e^{c_{Tm} |\theta_1|}, \quad (16)$$

где $m_{\min}$ – минимальное значение модуля управляющего воздействия; c_{Tm} – постоянная экспоненты.

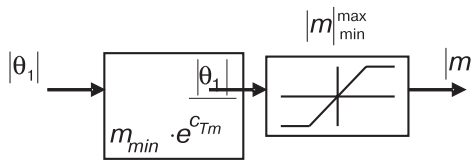


Рис. 7. Блок настройки масштабирования управляющего воздействия

В результате ручной настройки были получены следующие параметры масштабирования входных и выходных сигналов нечеткого регулятора:

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 [-30;30], c^{-1} \\ c_T = 0,6, c^{-1} \\ |\dot{\omega}|_{\min} = 60, c^{-2} \\ \Delta\theta_3 [-6000;6000], c^{-3} \\ c_{Tm} = 200, c^{-1} \\ m_{\min} = 0,1, c^{-1} \\ |m|_{\min} = 0,1, c^{-1} \\ |m|_{\max} = 2, c^{-1} \end{cases} \quad (17)$$

Результаты моделирования работы ненагруженного двигателя приведены на рис. 8 и 9. На рис. 8 пунктиром показано изменение заданной скорости, непрерывной линией – переходной процесс, соответствующий обработке этого изменения системой управления. На рис. 9 приведен график управляющего воздействия,

поступающего на привод управления дроссельной заслонкой.

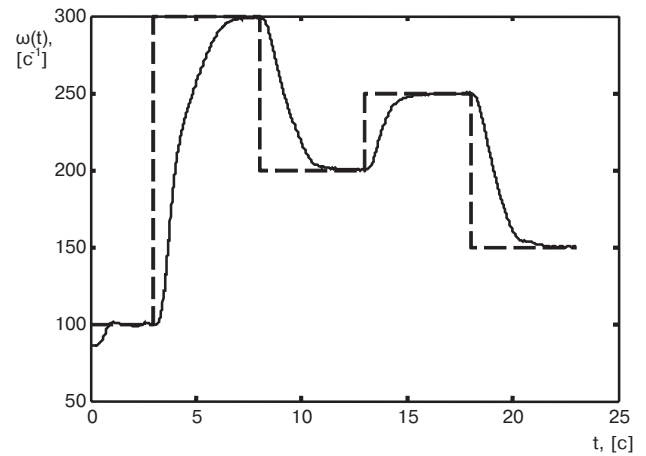


Рис. 8. Переходная характеристика системы двигатель-регулятор

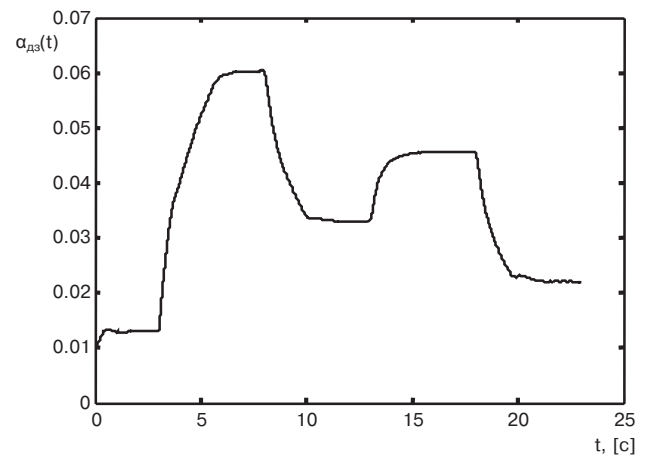


Рис. 9. Степень открытия дроссельной заслонки

Как видно из графиков, полученный регулятор имеет небольшую колебательную составляющую в режиме малой мощности (при степени открытия дроссельной заслонки меньше 0,03), что проявляется в появлении перерегулирования при разгоне и преждевременном торможении при замедлении. Также можно отметить, что изменение степени открытия дроссельной заслонки происходит плавно, без резких скачков.

Переходные характеристики при изменении момента нагрузки на вал двигателя и атмосферного давления приведены на рис. 10–

13. При этом коротким пунктиром (рис. 10, 12) показано изменение момента нагрузки, действующего на вал двигателя, и атмосферного давления соответственно. На рис. 11, 12 показано изменение управляющего воздействия.

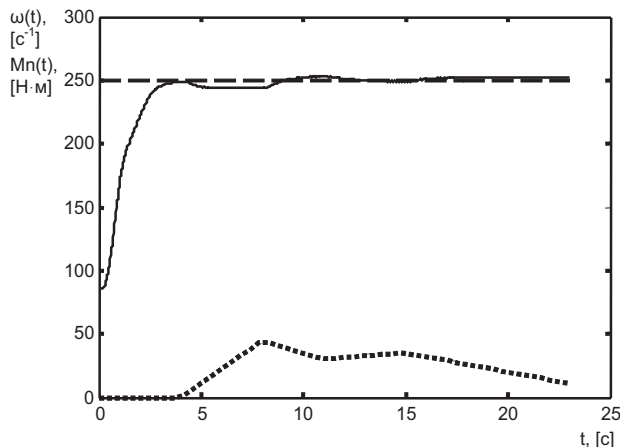


Рис. 10. Переходная характеристика системы «двигатель-регулятор» при изменении момента нагрузки

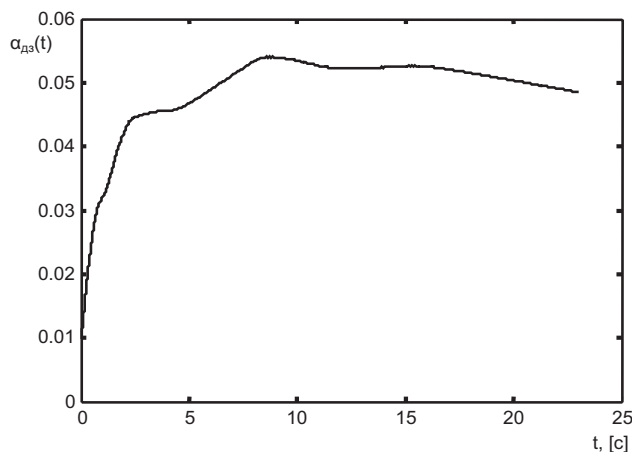


Рис. 11. Степень открытия дроссельной заслонки $\alpha_{дз}(t)$ при изменении момента нагрузки

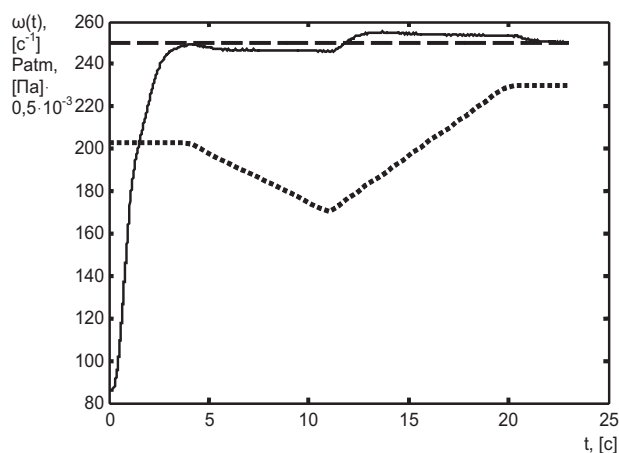


Рис. 12. Переходная характеристика системы «двигатель-регулятор» при изменяющемся атмосферном давлении

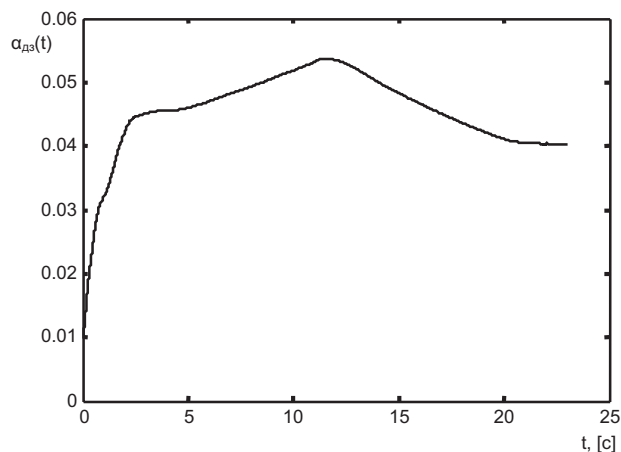


Рис. 13. Степень открытия дроссельной заслонки $\alpha_{дз}(t)$ при изменяющемся атмосферном давлении

Заключение

Предложенный нечеткий регулятор позволяет осуществлять управление двигателем внутреннего сгорания в условиях неопределенности его параметров при изменяющихся моменте нагрузки и атмосферном давлении. Показано, что при работе двигателя в режиме малой мощности возможно появление колебательной составляющей ошибки. Установившаяся ошибка при неизменной нагрузке и/или атмосферном давлении изменяется в незначительных пределах вокруг нулевого значения. Ошибка при постоянной скорости изменения момента нагрузки и/или атмосферного давления не равна нулю.

Полученные результаты могут быть использованы при построении системы управления автомобилем, при реализации подсистемы управления скоростью движения по трассе.

Список литературы

1. Russell J.D., Rutkowski B.D. Speed Control Method, U.S.: Patent #6,962,139, 2005.
2. Mauser H., Thurner E. Electronic Throttle Control – A Dependability Case Study // Journal of Universal Computer Science. 1999. Vol. 5. № 10. P. 712–729.
3. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / Пер. с англ. Ю.А. Данилова и В.В. Белого. – М.: Мир, 2002. – 461 с.

4. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование: Учебник для вузов / В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров и др. / Под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. – М.: Высш. школа, 2005. – 400 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов ДВС: Учебник для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Т.Ю. Кричевская и др. / Под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. – М.: Высш. школа, 2005. – 414 с.
6. Агуреев И.Е. Анализ и синтез характеристик многоцилиндровых поршневых двигателей внутреннего сгорания: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.02. – Тула, 2003.
7. Губичев М.Е. Разработка адаптивной микропроцессорной системы автоматического управления двигателем внутреннего сгорания: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. – М., 1989.
8. Чернецкий В.О., Чернецкая И.В. Анализ и синтез систем управления с нечеткой логикой: Учебное пособие. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 51 с.
9. Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Системы управления с нечеткой логикой. – СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. – 58 с.
10. Гостев В.И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления. – К.: Радиоаматор, 2003. – 510 с.