

УДК 681.532.55

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

К.Б. Алексеев, А.А. Малявин



АЛЕКСЕЕВ
Кир
Борисович

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

Введение

В последнее время повышается интерес к разработке интеллектуальных систем управления различными сложными техническими объектами. Характерным отличием таких систем по сравнению с традиционными, построенными на базе принципа пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, является формирование стратегии управления, основанной на моделировании про-

цесса мышления человека. Преимущества интеллектуальных систем проявляются в тех случаях, когда объект описывается сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений, в том числе и с частично неопределенными параметрами.

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является одним из таких объектов [1]. Синтезировать управление скоростью вращения коленчатого вала ДВС методами классической линейной теории не удастся из-за существенной нелинейности характеристик двигателя как



МАЛЯВИН
Александр
Анатолевич

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

объекта управления и отсутствия адекватной математической модели, в полной мере отражающей его динамические свойства.

В статье [2] приведено описание синтеза закона управления скоростью вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания, основанного на использовании нечеткой логики.

Для вычисления управляющего воздействия использовалась информация о текущей ошибке скорости вращения коленчатого вала двигателя и первой и второй производных от нее. В соответствии с методикой построения системы управления на базе нечеткой логики было проведено преобразование этой информации в три лингвистические переменные по каждой измеряемой координате. На основании правил, представленных в статье [2] в виде таблицы, лингвистические переменные были преобразованы в пять термов выходной переменной. Проведенная по методу центра тяжести дефаззификация позволила получить управляющее воздействие, качественные показатели которого иллюстрируются приведенными в статье графиками. В частности, при разгоне двигателя от 86 с^{-1} до 250 с^{-1} время регулирования составило около 4 с при отсутствии перерегулирования. При нагружении коленчатого вала моментом, изменяющимся с постоянной скоростью $12,5 \text{ (Н} \cdot \text{м)}/\text{с}$, в пределах от 0 до $50 \text{ Н} \cdot \text{м}$ снижение скорости вращения не превысило 5 %. Снижение или увеличение скорости вращения в зависимости от уменьшения или увеличения атмосферного давления также не превысило 5 %. Такие показатели можно считать приемлемыми.

Синтез ПИД регулятора

Особый интерес вызывает зависимость степени открытия дроссельной заслонки от времени, полученная при разгоне двигателя. Вместе с аналогичной зависимостью для ошибки регулирования они представляют собой численную формулировку закона управления.

Имея в распоряжении закон управления, реализуемый нечетким регулятором, можно аппроксимировать с его помощью ПИД регуля-

тора. Несмотря на неизбежные потери точности, такая аппроксимация позволит аппаратно реализовать управление, используя RC-цепи, не прибегая к сложной элементной базе. При этом автоматически решается проблема устойчивости системы управления.

Структурная схема такого регулятора в дискретном исполнении (вместо преобразования Лапласа используется z-преобразование) приведена на рис. 1.

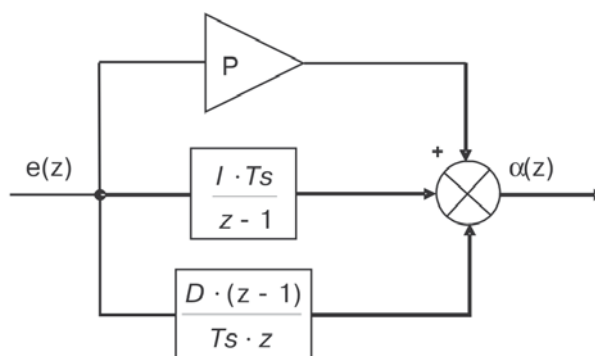


Рис. 1. Структурная схема дискретного ПИД регулятора:

$e(z)$ – сигнал ошибки, поступающий на вход регулятора; P – коэффициент усиления пропорциональной составляющей закона управления; I – коэффициент усиления интегральной составляющей закона управления; T_s – период дискретизации; D – коэффициент усиления дифференциальной составляющей закона управления; $\alpha(z)$ – степень открытия дроссельной заслонки

Задача синтеза сводится к поиску минимума функционала следующего вида:

$$\min_{P, I, D} \frac{1}{2} \sum_i (u_i^*(e_i) - u_i^{\text{ПИД}}(P, I, D, e_i))^2$$

$$\text{при } \begin{cases} P_{\min} < P < P_{\max} \\ I_{\min} < I < I_{\max} \\ D_{\min} < D < D_{\max} \end{cases}, \quad (1)$$

где u_i^* – желаемый закон управления, полученный при работе нечеткого регулятора; e_i – ошибка регулирования; $u_i^{\text{ПИД}}$ – закон управления, реализуемый ПИД регулятором; $P_{\min}, I_{\min}, D_{\min}$ – нижние ограничения для коэффициентов усиления ПИД регулятора; $P_{\max}, I_{\max}, D_{\max}$ –

верхние ограничения для коэффициентов усиления ПИД регулятора.

Такая постановка представляет собой классическую задачу квадратичного программирования, решение которой может быть получено с использованием различных модификаций метода градиентного спуска, например, с помощью метода Гаусса-Ньютона.

Рассмотрим пример решения данной задачи. Для этого определим следующие условия:

1) пусть u_i^* , e_i – желаемый закон управления и ошибка регулирования, полученные в результате записи при переходном процессе в течение первых 8 секунд с дискретностью 0,01, возникающем в ответ на подачу ступенчатого задающего сигнала, соответствующего желаемой скорости вращения 250 с^{-1} ;

2) примем $P_{\min}=I_{\min}=D_{\min}=0$, $P_{\max}=I_{\max}=D_{\max}=2$, $P_{\text{begin}}=I_{\text{begin}}=D_{\text{begin}}=0,01$ (P_{begin} , I_{begin} , D_{begin} – начальные значения соответствующих коэффициентов усиления ПИД регулятора);

3) в качестве алгоритма решения используем алгоритм Гаусса-Ньютона.

Тогда в результате минимизации функцио-

нала (1) при заданных выше условиях за 500 итераций были получены следующие величины для коэффициентов усиления ПИД регулятора: $P=5,5409 \cdot 10^{-6}$, $I=1,723310 \cdot 10^{-4}$, $D=1,4901 \cdot 10^{-8}$.

Фрагмент графика (за первые 100 итераций) изменения средней квадратичной ошибки mse , приведенный на рис. 2, позволяет убедиться в сходимости выбранного алгоритма.

Среднее квадратичное отклонение полученного закона управления от эталонного, соответствующего работе нечеткого регулятора, составило $6,948 \cdot 10^{-7}$ при размере выборки, равном 801 элементу. Сходство нечеткого закона управления и его аппроксимации иллюстрируется на рис. 3. Следует отметить более плавное изменение управляющего воздействия ПИД регулятора.

Системы управления скоростью вращения коленчатого вала, построенные на базе нечеткого и ПИД регуляторов, были проверены путем численного моделирования при одинаковых внешних условиях, симулирующих работу реального двигателя при изменении момента нагрузки M_c и момента инерции J .

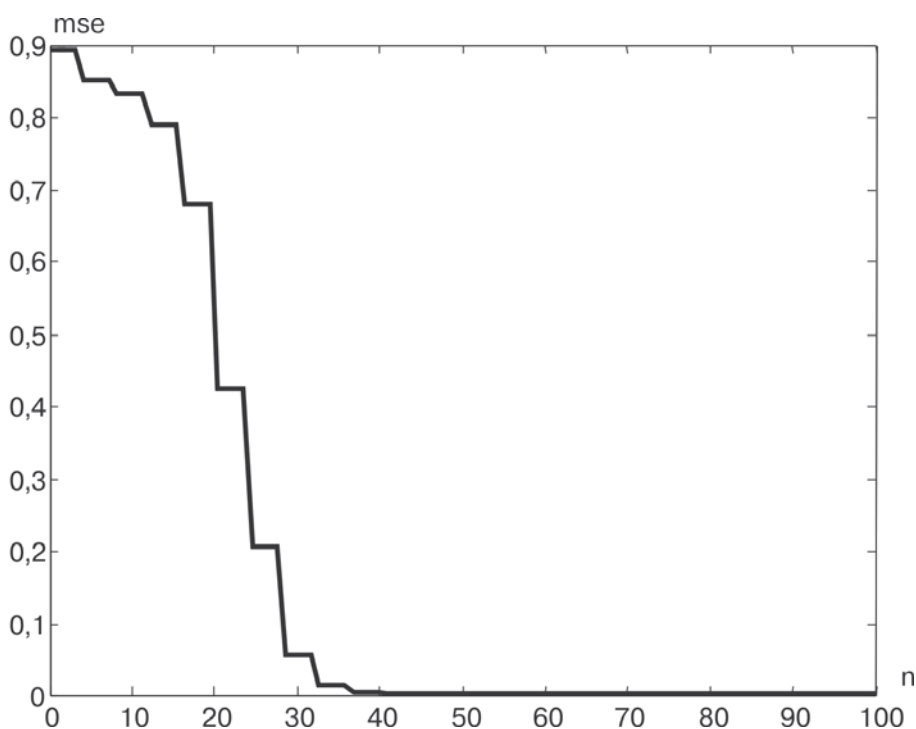


Рис. 2. Изменение средней квадратичной ошибки в зависимости от номера итерации при работе алгоритма Гаусса-Ньютона

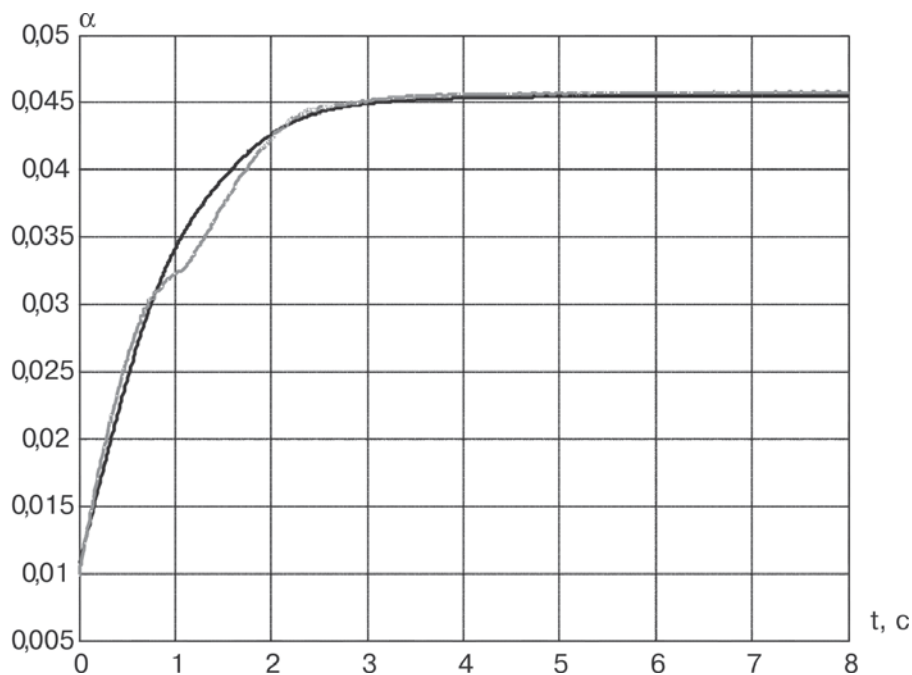


Рис. 3. Управляющее воздействие нечеткого и ПИД регулятора
на заключительном этапе вычислений:

— α^{HP} – степень открытия дроссельной заслонки, задаваемая нечетким регулятором;
 — $\hat{\alpha}^{ПИД}$ – степень открытия дроссельной заслонки, полученная в результате
 аппроксимации ПИД регулятором

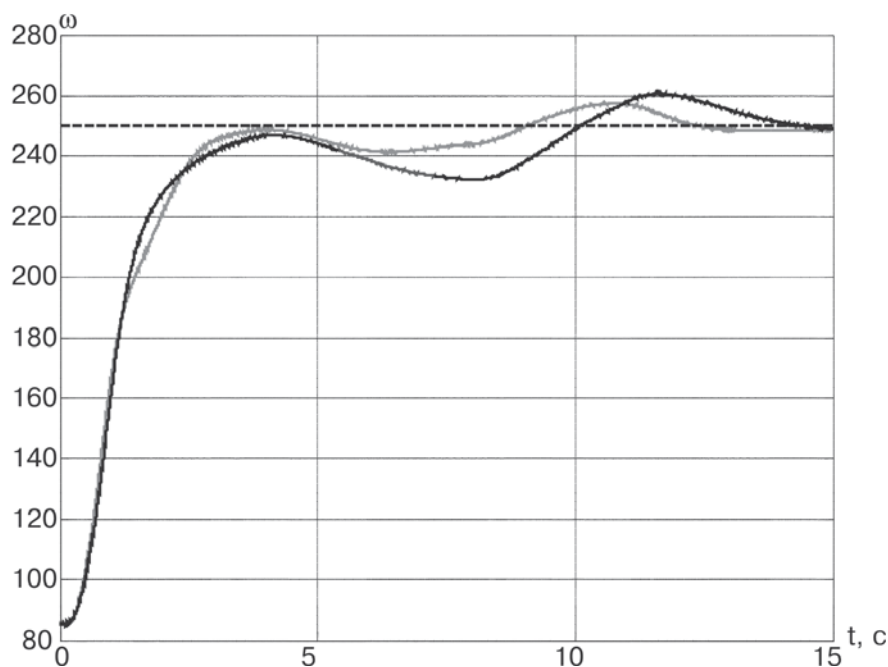


Рис. 4. Переходной процесс работы двигателя под управлением нечеткого регулятора и ПИД регуляторов:

— ω^{HP}, c^{-1} – заданная скорость вращения коленчатого вала двигателя;
 - - - ω^*, c^{-1} – скорость вращения под управлением нечеткого регулятора;
 — $\omega^{ПИД}, c^{-1}$ – скорость вращения под управлением ПИД регулятора

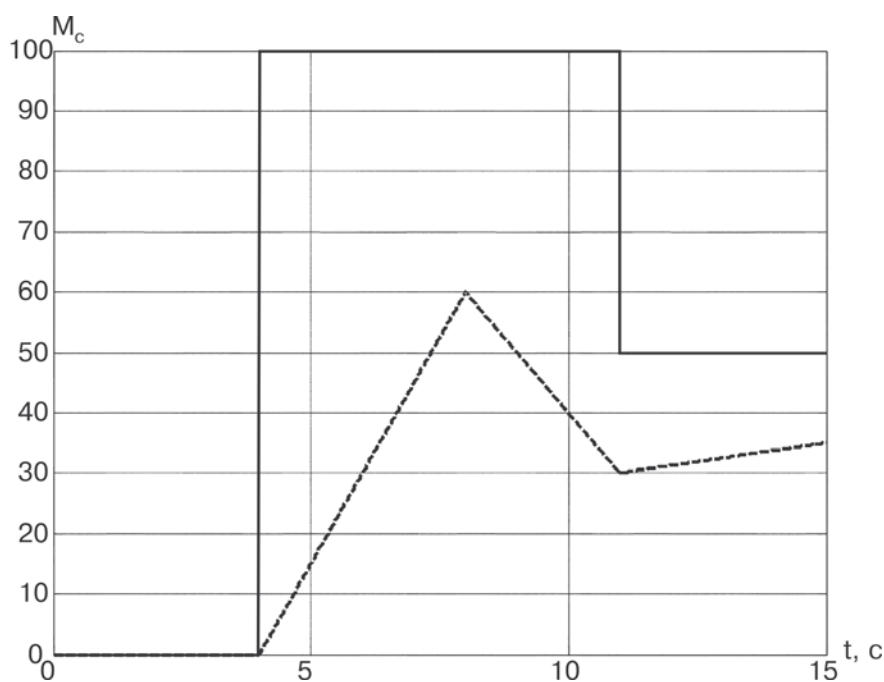


Рис. 5. Изменение момента инерции и момента сопротивления нагрузки, действующей на вал двигателя:

----- M_c , Н·м – момент инерции нагрузки; — J , кг·м²·100 – момент сопротивления нагрузки

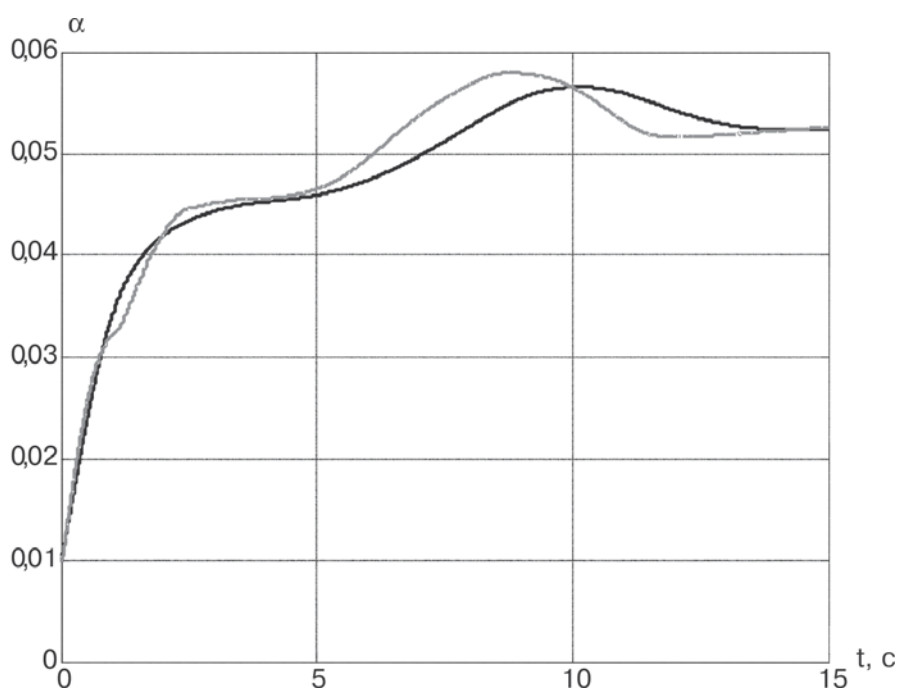


Рис. 6. Изменение управляющего воздействия нечеткого и ПИД регуляторов:

— $\alpha_{\text{ПИД}}$ – степень открытия дроссельной заслонки, задаваемая нечетким регулятором;
 — $\alpha_{\text{НР}}$ – степень открытия дроссельной заслонки, задаваемая ПИД регулятором

Результаты проведенного эксперимента, представленные на рис. 4–6, позволяют выявить отличия в функционировании обеих систем управления.

На первом этапе численного эксперимента

при $t \in [0, 4]$, с двигатель был отключен от внешней нагрузки (рис. 5). Как видно из этого участка графика (рис. 4), в переходном процессе под управлением ПИД регулятора отсутствуют характерные для нечеткого регулятора резкие изме-

нения ускорения при подходе к области желаемой скорости вращения ($\omega \in [200, 250], \text{с}^{-1}$), что является следствием более плавного изменения управляющего воздействия ПИД регулятора (рис. 6).

Когда скорость вращения вала двигателя вплотную приблизилась к желаемой, к нему была подключена нагрузка с моментом инерции, равным $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, и моментом сопротивления, изменяющимся по линейному закону с постоянной скоростью $15(\text{Н} \cdot \text{м})/\text{с}$. Ступенчатый характер изменения момента инерции обусловлен принятым допущением о том, что время, необходимое для переключения коробки передач, является незначительным.

Как видно из результатов, представленных на рис. 4, нечеткий регулятор успевает раньше реагировать на изменение характера нагрузки и его ошибка не превышает $8,4 \text{ с}^{-1}$ (3,4 %), в то время как ПИД регулятор за отведенное время ($t \in [4, 8], \text{с}$) показал ошибку $17,3 \text{ с}^{-1}$ (6,9 %), не успев до конца отреагировать на возмущение, внесенное нагрузкой. На оставшемся отрезке времени ($t \in [8, 15], \text{с}$) ПИД регулятор продемонстрировал аналогичное поведение.

Графики, приведенные на рис. 6, показывают, что управляющее воздействие $\alpha^{\text{ПИД}}$ регулятора отстает во времени от управляющего воздействия нечеткого регулятора $\alpha^{\text{НП}}$, что в значительной степени обусловило то, что ПИД регулятор показал худшие результаты, чем нечеткий регулятор. Однако, данный факт можно считать ожидаемым вследствие возможной

неполноты выборки, описывающей поведение эталонного переходного процесса, и неизбежных ошибок аппроксимации.

Заключение

В результате проведенного ранее исследования [2], была показана возможность синтеза регулятора системы управления скоростью вращения коленчатого вала ДВС на основе нечеткой логики в виде программного обеспечения, имеющего приемлемые качественные показатели управления.

Результаты работы данного регулятора (запись изменения во времени сигналов ошибки и управляющего воздействия) были использованы для настройки параметров ПИД регулятора.

Сравнение обоих регуляторов, выполненное при равных условиях в ходе численного моделирования свидетельствует, что нечеткий регулятор обеспечивает отработку возмущений по моменту нагрузки и моменту инерции с меньшей ошибкой, чем ПИД регулятор.

Список литературы

1. Агуреев И.Е. Анализ и синтез характеристик многоцилиндровых поршневых двигателей внутреннего сгорания: Дисс. ... д-ра техн. наук. Тула, 2003.
2. Алексеев К.Б., Малявин А.А. Управление скоростью вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания на базе нечеткой логики // Машиностроение и инженерное образование. 2007. №1. С. 14–24.