

УДК 629.735

Е. А. КОНОНЫХИН, С. В. ЕПИФАНОВ, Е. В. ПАВЛЮК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ
АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Важным параметром, определяющим качество работы системы управления авиационным двигателем, является точность поддержания расхода топлива и скорость изменения расхода топлива дозирующим элементом. На данный момент, в связи с быстрым развитием вычислительной техники и появлением компактной силовой электроники, все большее распространение получают электромеханические исполнительные механизмы, в частности, в насосе-дозаторе двигателей семейства АИ-450 используется моментный двигатель. Ключевой особенностью моментного двигателя является высокое значение силы трения. Проанализирована возможность применения различных регуляторов для управления системами с трением. Проведено математическое моделирование взаимодействия различных регуляторов с исполнительным механизмом насоса-дозатора двигателя АИ-450. Для данного исполнительного механизма предложена структура регулятора на базе нечеткой логики.

Ключевые слова: нечеткая логика, математическая модель, ПИД-регулятор.

Введение

Развитие электроники позволяет использовать более сложные алгоритмы управления авиационными двигателями, которые значительно улучшают качество управления. Помимо этого, использование быстродействующей электроники позволяет использовать более простые и надежные исполнительные механизмы, которые раньше были неспособны обеспечить необходимое качество управления. К данному типу механизмов можно отнести моментные двигатели, которые до недавнего времени не использовались для управления элементами дозирования топлива, поскольку не могли обеспечить необходимую точность позиционирования. В данной работе приведено исследование различных регуляторов для управления угловым положением моментного двигателя, применяемого в структуре агрегатов топливной автоматики авиационных двигателей (насосов-дозаторов). Управление данным моментным двигателем осуществлялось по электрическим командам, а измерение положения дозирующего элемента осуществлялось с использованием датчика углового положения. Другими словами, входным воздействием на объект управления являлось напряжение, подаваемое на катушки индуктора, а выходным - угол поворота дозирующего элемента. Отличительной особенностью данного объекта управления является высокое значение силы «сухого трения» на выходном звене, значение которой изменяется в широком диапазоне, при относительно низком моменте инерции ротора моментного двигателя. Сила трения меняется не только во время длительной эксплуатации, а даже при смене режима работы силовой установки, и слабо зависит от изме-

ряемых параметров. Также объект управления не обладает статизмом, а к данной системе предъявляются жесткие требования к точности поддержания выходного параметра. Подробный анализ объекта управления приведен в [1].

1. Регуляторы для управления системами с трением

На данный момент наибольшее распространение для управления системами с трением получили следующие виды регуляторов [2-6]:

- ПИД регуляторы;
- ПД регуляторы;
- Системы с переменной структурой;
- Системы с наблюдателем силы трения в структуре регулятора.

Первоначальная оценка эффективности использования различных типов регуляторов осуществлялась посредством математического моделирования. При моделировании использовалась непрерывная модель объекта управления, прошедшая идентификацию по результатам испытания. Модель объекта управления содержала модель индуктора, с нелинейной зависимостью магнитодвижущей силы от углового положения и стандартную модель силы трения программы Simulink, зависящую от скорости перемещения дозирующего элемента. В модели системы управления использовались дискретные регуляторы, работающие на частоте 50Гц.

Результаты моделирования показали, что ПИД регулятор как в чистом виде, так и с ограничением в отдельности по каждой из компонент не обладает достаточной устойчивостью из-за наличия интегральной компоненты. Управление с использовани-

ем ПД-регулятора не обеспечивало необходимую точность поддержания выходного параметра во всем диапазоне сил трения. Наилучшее качество управления обеспечивал регулятор с переменной структурой, в котором при наличии движения выходного звена использовался ПД-регулятор, а при отсутствии движения – ПИ-регулятор. Регулятор с переменной структурой используется на данный момент в большей части САУ двигателей семейства АИ-450.

Помимо этого, смежными предприятиями отрасли для САУ данного двигателя была предложена система управления с наблюдателем силы трения, а также разработан релейный адаптивный алгоритм управления. Данные регуляторы являются разновидностями адаптивных регуляторов, подстраивающие свои параметры под свойства объекта управления. Недостатками данных регуляторов являются задержки в управлении, вызванные необходимостью подстройки регулятора при изменении силы трения. Поскольку сила трения меняется не только во время длительной эксплуатации, а даже при смене режима работы двигателя, необходимость затраты времени на адаптацию является существенным недостатком данных видов регуляторов.

В данной работе исследовалась возможность использования регулятора на базе нечеткой логики, который по своей сути является развитием вышеописанного регулятора с переменной структурой.

2. Регулятор на базе нечеткой логики

Для первоначальной отладки регулятора была составлена модель регулятора в Simulink (рис. 1). Как видно из рисунка, на вход в блок нечеткой логики подаются три сигнала:

- значение скорости перемещения дозирующего элемента после экспоненциальной фильтрации;
- разность между заданным и действительным положением дозирующего элемента;

– выход из дискретного интегратора, выполненного в виде блока памяти и сумматора.

– На выходе из блока нечеткой логики формируются два сигнала:

- управляющий сигнал для объекта управления (управление скважностью ШИМ);
- сигнал управления интегральной составляющей.

Для настройки нечеткого регулятора была использована программа FIS Editor, являющаяся частью комплекса MatLab. Был выбран алгоритм работы «Mamdani». В базе правил было использовано условие «и» по минимальной компоненте для пересекающихся нечетких множеств, так как оно обладает большим быстродействием. Агрегация проводилась путем выбора максимальной компоненты. Дефазификация проводилась методом определения центра тяжести.

Для функционирования алгоритма нечеткой логики были сформированы функции принадлежности для всех входных и выходных сигналов (табл. 1).

Таблица 1

Перечень функций принадлежности

Наименование параметра	Функции принадлежности
Скорость перемещения выходного звена (входной параметр)	Большая отрицательная, малая отрицательная, нулевая, малая положительная, большая положительная.
Ошибка управления (входной параметр)	Отрицательная, положительная, нулевая
Значение интегральной составляющей (входной параметр)	Отрицательная, положительная, нулевая
Управление (приростом значения) интегральной составляющей (выходной сигнал)	Отрицательная, положительная, нулевая
Управляющий сигнал (выходной сигнал)	Отрицательная, положительная, нулевая

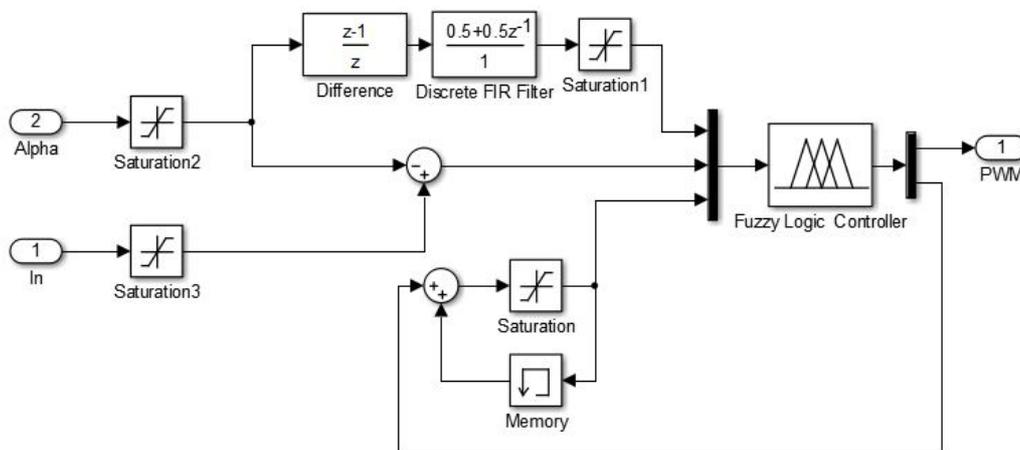


Рис. 1. Структурная схема нечеткого регулятора

База правил данного регулятора построена таким образом, что при низких скоростях перемещения данный нечеткий регулятор фактически повторяет работу ПИ-регулятора, а при наличии движения – ПД-регулятора. Однако переход с одного типа регулятора на другой происходит не скачкообразно, как в регуляторах с переменной структурой, а плавно. За счет введения нечеткости, во время работы в скользящем режиме, регулятор как бы одновременно является и ПИ- и ПД-регулятором. При этом, при отсутствии движения или при больших скоростях перемещения реализуются все преимущества данных типов регуляторов. На рис. 2 и 3 изображено функционирование нечеткого регулятора при наличии и отсутствии движения.

3. Математическое моделирование

Для оценки эффективности управления был проведен сравнительный анализ регулятора на базе нечеткой логики с регулятором, имеющим переменную структуру. Переходные процессы изменения положения дозирующего элемента, вызванные ступенчатым изменением заданного значения положения дозирующего элемента, изображены на рис. 4 и 5.

Результаты моделирования показали, что базовый регулятор с переменной структурой в целом

обеспечивает достаточное быстродействие и качество регулирования для обеспечения выполнения функции дозирования топлива в насосе-дозаторе. Вместе с тем регулятор на базе нечеткой логики обладает более высоким быстродействием. У данного регулятора малое время переходного процесса и отсутствует перерегулирование при расчете реакции системы на ступенчатое изменение заданного угла положения при ненулевом коэффициенте трения (в случае, если нет необходимости в таком быстром изменении углового положения, ее можно искусственно понизить, изменив настройки). Большая скорость перемещения приводит к перерегулированию в случае нулевого коэффициента сухого трения. Для предотвращения удара об упор рекомендуется при окончательной доводке регулятора добавить функции принадлежности, характеризующие близость к упору, и специальные правила, предотвращающие удар. Во время расчета на влияние уровня шума на полосу пропускания системы нечеткий регулятор проявил себя как один из самых устойчивых, а амплитудное значение перемещения было ближе всех к эталонному. Кроме этого, данный регулятор проявил себя как лучший, во время расчета на полосу пропускания. На рис. 4 и 5 изображены переходные процессы изменения положения выходного звена при ступенчатом изменении входного сигнала.

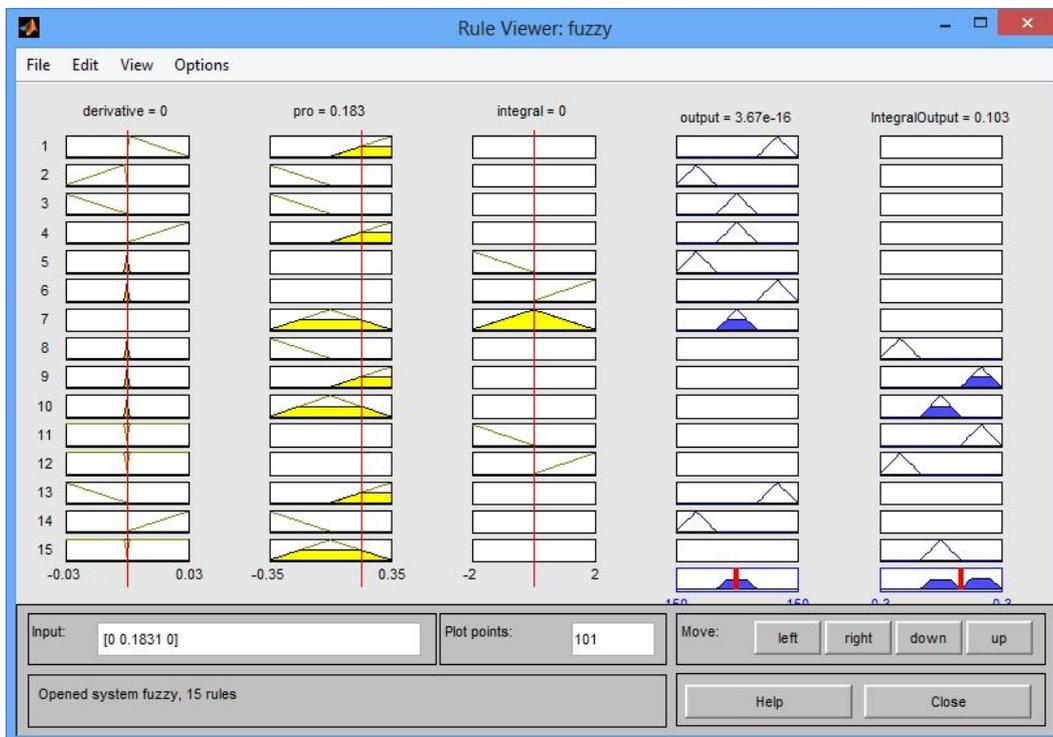


Рис. 2. Функционирование нечеткого регулятора при отсутствии движения

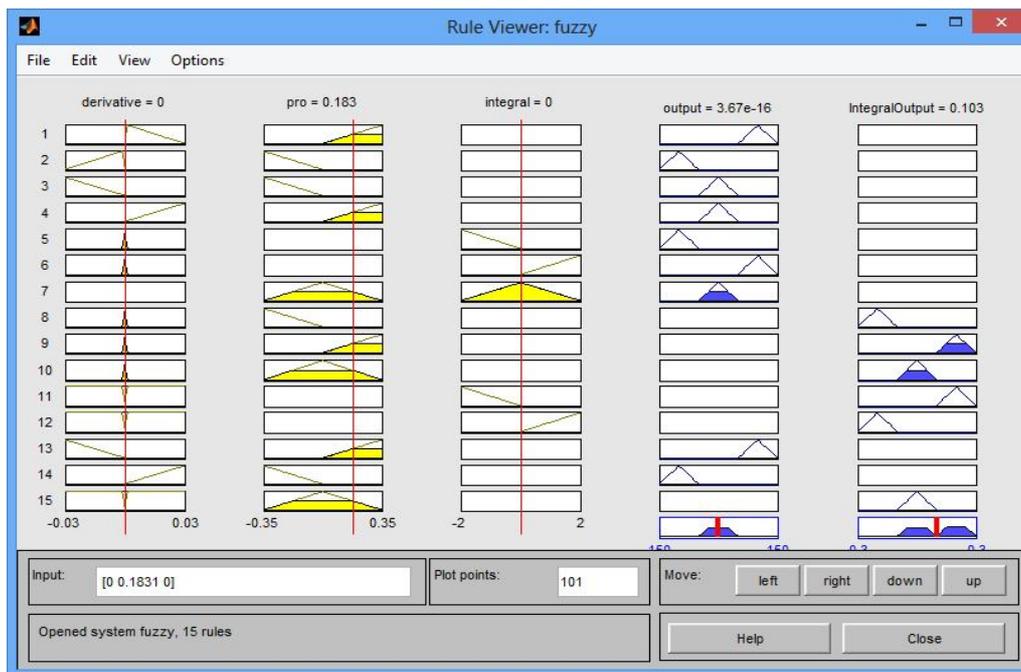


Рис. 3. Функционирование нечеткого регулятора при наличии движения

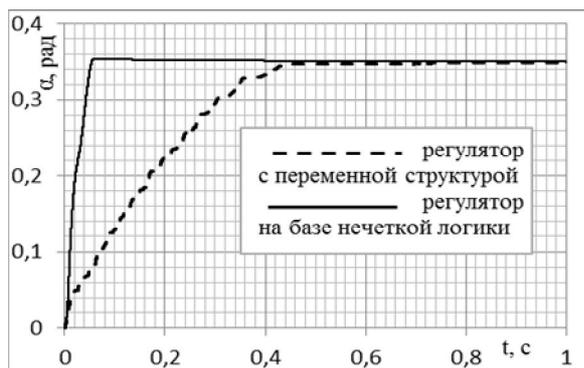


Рис. 4. Переходной процесс, вызванный ступенчатым изменением заданного положения при нормальной силе трения

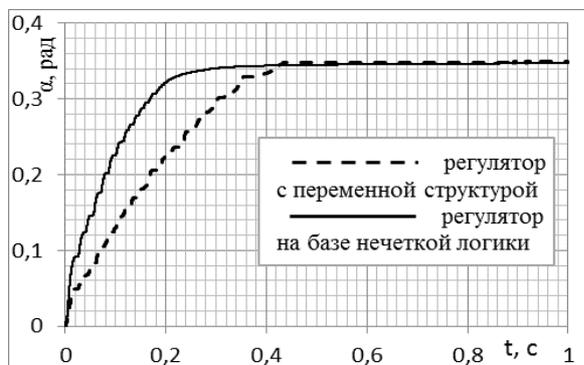


Рис. 5. Переходной процесс, вызванный ступенчатым изменением заданного положения при максимальной силе трения

Заключение

В результате проведения данной работы была предложена структура регулятора на базе нечеткой логики для управления системами с трением. Несмотря на то, что регулятор представленный в данной статье, по своей сути, не сильно отличается от регулятора с переменной структурой, переход с одного типа регулятора на другой в регуляторе на базе нечеткой логики происходит не скачкообразно, а плавно. Введение нечеткости во время работы в скользящем режиме регулятора создает дополнительную степень свободы при отладке скользящего режима, позволяя изменять не только параметры регуляторов, но и плавность перехода между различными регуляторами, что обеспечивает дополнительную степень свободы, позволяющую улучшить качество управления системой. Также был составлен программный код программы, реализующий алгоритмы управления на базе нечеткой логики, и проведена проверка корректности работы данного алгоритма на полунатурном стенде, которая показала, что данный алгоритм обладает достаточным быстродействием и качеством управления.

Литература

1. Ранченко, Г. С. Особенности объекта управления в САУ расходом топлива авиационного двигателя и анализ режимов функционирования системы [Текст] / Г. С. Ранченко, В. Ф. Миргород //

Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – № 6. – С. 129–132.

2. Armstrong-Helouvry, B. *A Survey of models, analysis tools, and compensation methods for the control of machines with friction [Text]* / B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont, C. Canudas de Wit // *Automatica*. – 1994. – Vol. 30, N 7. – P. 1083–1138.

3. Canudas-de-Wit, C. *A new model for control of systems with friction [Text]* / C. Canudas-de-Wit, H. Olsson, K.J. Astrom [et al.] // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1995. – Vol. 40. – P. 419–425.

4. Marton, L. *Modeling, identification, and com-*

ensation of stick-slip friction [Text] / L. Marton, B. Lantos // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2007. – Vol. 54, № 1. – P. 511–521.

5. Ларин, В. Б. *О компенсации нелинейного трения в робототехнических системах [Текст]* / В. Б. Ларин // *Прикладная механика*. – 1996. – Т 32, № 5. – С. 69–74.

6. Потапенко, Е. М. *Сравнительная оценка робастных систем управления с различными типами наблюдателей [Текст]* / Е. М. Потапенко // *Теория и системы управления*. – 1995. – № 1. – С. 109–117.

Поступила в редакцию 22.04.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом Б. И. Кузнецов, Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины, Харьков.

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВИКОНАВЧИМ МЕХАНІЗМОМ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Є. О. Кононихін, С. В. Єпіфанов, Є. В. Павлюк

Важливим параметром, що визначає якість роботи системи управління двигуном є точність підтримання витрати палива і швидкість зміни витрати палива дозуючим елементом. На даний момент, у зв'язку з швидким розвитком обчислювальної техніки і появою компактної силової електроніки, все більшого поширення набувають електромеханічні виконавчі механізми зокрема в насосі-дозаторі двигунів сімейства AI-450 використовується моментний двигун. Ключовою особливістю даної системи є високе значення сили тертя. Проаналізовано регулятори для управління системами з тертям. Проведено математичне моделювання взаємодії різних регуляторів з виконавчим механізмом насоса-дозатора двигуна AI-450. Для даного виконавчого механізму запропонована структура регулятора на базі нечіткої логіки.

Ключові слова: нечітка логіка, математична модель, ПІД-регулятор.

AIRCRAFT ENGINE ACTUATORS CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC

E. A. Kononykhin, S. V. Yepifanov, E. V. Pavlyuk

An important parameter in determining the performance of the engine control system is the accuracy of maintaining the fuel consumption and the rate of fuel consumption change by metering member. Now, due to the rapid development of computer technology and the advent of compact power electronics electromechanical actuators are becoming more common. In particular, in fuel control system of AI-450 family of engines torque motor is used. A key feature of this system is the high value of the friction force. Regulators for control of systems with friction were analyzed. Mathematical modeling of the interaction of various controllers with aircraft engine fuel system actuator was performed. The control algorithm based on fuzzy logic is proposed for this actuator.

Key words: fuzzy logic, mathematical model, the PID controller.

Кононихин Евгений Александрович – магистр кафедры конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Епіфанов Сергей Валериевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Павлюк Евгений Викторович – канд. техн. наук, первый заместитель Главного конструктора директора ГП "Харьковское агрегатное конструкторское бюро", Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.