

## **Применение нечеткого регулятора для повышения качества системы управления КЛА на базе двигателей-маховиков, включенных по дифференциальной схеме**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Исследован вопрос создания системы стабилизации космического летательного аппарата с помощью двигателей-маховиков на основе дифференциальной схемы включения. Анализ принципов построения имеющихся систем выявил ряд существенных недостатков, которые приводят к возникновению нутационных колебаний, появлению насыщения в двигателях-маховиках, а также неточной выработке требуемого управляющего момента. В связи с этим в работе предложен принцип построения системы на базе нечеткого управления. Введен блок нечеткого регулятора, который позволяет повысить качество функционирования и увеличить точность ориентации и стабилизации КА в пространстве.

**Ключевые слова:** система управления, малогабаритный космический аппарат, нечеткий регулятор, система ориентации и стабилизации, двигатели-маховики, дифференциальный режим.

**Введение.** Системы управления космическими летательными аппаратами и ракетно-космическими комплексами представляют собой сложные автоматические системы, уникальные по своей точности и многообразию выполняемых задач. Для их создания потребовалось существенное развитие теории управления и использование самых последних достижений науки и техники.

Исходя из принципа «быстрее – лучше – дешевле» в настоящее время ведущими космическими странами активно прорабатывается концепция создания «орбитальных группировок» на базе малых космических аппаратов (МКА). МКА – это не только малая масса, стоимость, но и переход на новую ступень космической техники, открывающей новые подходы и направления, связанные с архитектурой самого космического летательного аппарата (КЛА), миниатюризацией электронной и вычислительной техники, систем ориентации и стабилизации, исполнительных органов и приводов [1].

При условии длительного существования на орбите в качестве исполнительных органов наметилась явная тенденция применения двигателей-маховиков. При этом включение по дифференциальной схеме имеет ряд преимуществ при их использовании на КЛА [2, 3].

Кроме того, современное развитие методов управления характеризуется стремительным внедрением в системы управления регуляторов нечеткой логики [4, 5], что в отличие от традиционных систем управления, требующих на каждом шагу исследования применения математических моделей, точно и однозначно описывающих закономерности, протекающие в исследуемых системах, предполагает переход совсем на другой уровень мышления, при котором творческий процесс исследований происходит на самом высоком уровне абстракции и постулируется лишь минимальный набор закономерностей.

В связи с этим цель данной работы – рассмотреть возможность применения нечеткого регулятора для построения системы управления КЛА, в котором использованы для режимов ориентации и стабилизации двигатели-маховики, включенные по дифференциальной схеме.

**Постановка задачи исследования.** В теории управления особое внимание всегда уделялось проблеме синтеза математических моделей алгоритмов управления при недостаточной информации об объекте управления и действующих на него полезных сигналах и помехах. В связи с этим в рамках систем управления широкое распространение получили нечеткие логические регуляторы (НЛР). Такие регуляторы в ряде случаев способны обеспечивать более высокие показатели качества переходных процессов по сравнению с классическими П-, И-, ПД-, ПИ-, ПИД-регуляторами. НЛР можно отнести к экспертным регуляторам, алгоритмы синтеза которых трудно формализовать, особенно для сложных объектов, обладающих свойствами уникальности [6]. В этом случае к уникальным свойствам следует отнести свойства взаимной компенсации насыщения ДМ при их функционировании по дифференциальной схеме. На рис. 1 показан график моментов времени включения и выключения управляющего ДМ<sub>1</sub> и ДМ<sub>2</sub>, компенсирующего остаточный момент управляющего ДМ<sub>1</sub> после его выключения.

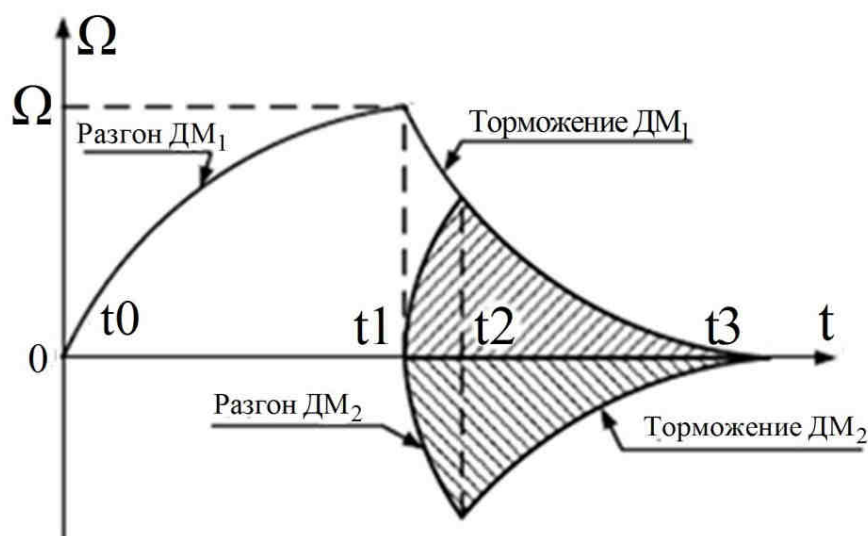


Рис. 1. График моментов времени включения и выключения управляющего (ДМ<sub>1</sub>) и компенсирующего (ДМ<sub>2</sub>) двигателей – маховиков

Как видно из рис.1, точность компенсации отрицательного момента управляющего ДМ<sub>1</sub> зависит от точности моментов времени включения  $t_1$  и выключения  $t_2$  компенсирующего двигателя-маховика ДМ<sub>2</sub>. Если учесть, что в процессе эксплуатации МКА на орбите сам объект управления и функциональные элементы его СУ подвергаются деградации, то значения моментов времени  $t_1$  и  $t_2$  могут соответственно изменяться по неизвестным законам. Таким образом, мы сталкиваемся с условиями недостаточной информации об объекте управления и действующих на него и его СУ полезных сигналах и деградационных помех, что соответствует обоснованному применению логико-лингвистического регулятора (ЛЛР) вместо, например, классического ПД-регулятора, обычно применяемого для систем ориентации и стабилизации КЛА.

В общем, цель данной работы может быть сформулирована следующим образом: исследовать применимость нечеткого регулятора для создания системы ориентации и стабилизации МКА при использовании двигателей-маховиков, включенных по дифференциальной схеме, в условиях недостаточной информации об объекте управления и действующих на него полезных сигналах и помех.

**Применение нечетких регуляторов в системах управления техническими объектами.** Создание систем автоматического управления для сложных технических объектов в условиях неопределенности и неполноты знаний об объекте, нечеткости описаний показало неэффективность применения только классических методов теории управления. Этим объясняется повышенный интерес к нечетким моделям нечеткости.

В последнее время наблюдается исключительно высокий интерес к одному из важнейших приложений нечетких множеств – анализу и синтезу нечетких регуляторов и систем управления технологическими процессами и установками. Это связано с тем, что их использование для сложных объектов не требует точного математического описания. Кроме того, такие системы способны сохранять свою работоспособность, несмотря на изменение параметров объекта и влияние на него внешних возмущений.

На основе нечеткой логики вводится простой подход к решению проблемы управления вместо попыток смоделировать систему математически.

Как свидетельствуют последние конгрессы IFAC, к настоящему времени в области нечетких регуляторов практически сформировались исследования трех их видов: логико-лингвистических, аналитических и обучаемых. На данном этапе более широкое применение в системах управления получили логико-лингвистические регуляторы (ЛЛР). ЛЛР базируются на нечетких множествах, логических операциях объединения, пересечения, композициях лингвистических переменных, нечетких отношениях и правилах вывода нечеткого выхода при известных входах.

Для системы управления, имеющей, например, один вход и один выход, построение ЛЛР обычно базируется на принципе [7]:

«если  $X$  есть  $X^1$ , то  $Y$  есть  $Y^1$ , иначе,  
если  $X$  есть  $X^2$ , то  $Y$  есть  $Y^2$ , иначе...»,  
где  $X$  – вход (обычно ошибка регулирования);  
 $Y$  – выход (регулирующее или управляющее воздействие);  
 $X^i, Y^i, i=1,2,\dots$  - нечеткие множества.

В целях реализации данного принципа ЛЛР включает в себя три основных блока (рис.2):

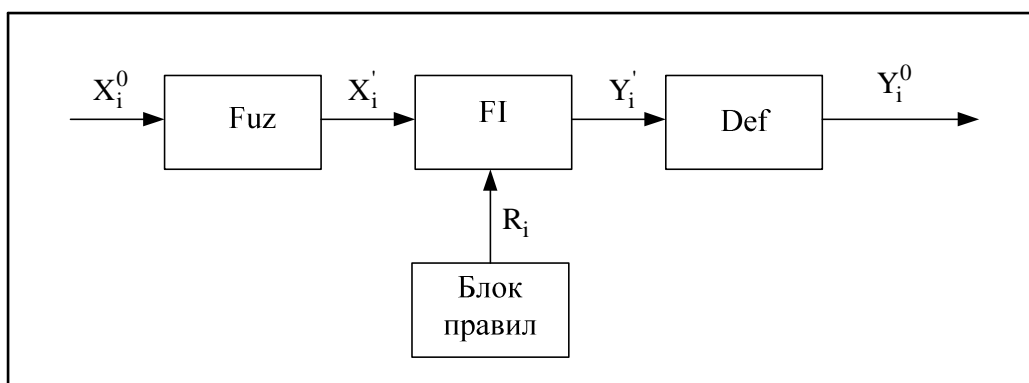


Рис. 2. Процедуры преобразования в нечетком регуляторе

На рис. 2 введены следующие обозначения:

- Fuz — блок фазификации, в котором входные измеряемые переменные (например, входные сигналы датчиков углов, угловых скоростей и т.д.) преобразуются в так называемые лингвистические переменные;

- FI — fuzzyinference — блок нечеткого вывода, в котором лингвистические выходы преобразуются по известным входам и совокупности правил ( $R_i$ ) в лингвистические значения выхода;
- Def — блок преобразования лингвистических значений выхода в действительные значения, т.е. блок дефазификации.

При этом входным измеряемым переменным  $X_i$  со значениями  $X_i^0$  соответствуют так называемые «вырожденные» нечеткие множества  $\tilde{X}_i$  с функциями принадлежности:

$$\tilde{X}_i = \begin{cases} 1, & \text{если } X_i = X_i^0; \\ 0, & \text{если } X_i \neq X_i^0. \end{cases}$$

К типовым формам задания функции принадлежности относятся: треугольная (trimf); трапецеидальная (trapmf); гауссова (gaussmf); двойная гауссова (gauss2f); обобщенная колоколообразная (gbellmf); сигмоидальная (sigmf); произведение двух сигмоидальных (psigmf), а также типа Z- и Pi-функции (Zmf и Pimf).

Конкретный вид данных функции определяется значениями параметров, входящих в их аналитические представления.

**Реализация поставленной задачи.** На рис. 3 показана функциональная схема системы ориентации и стабилизации МКА.

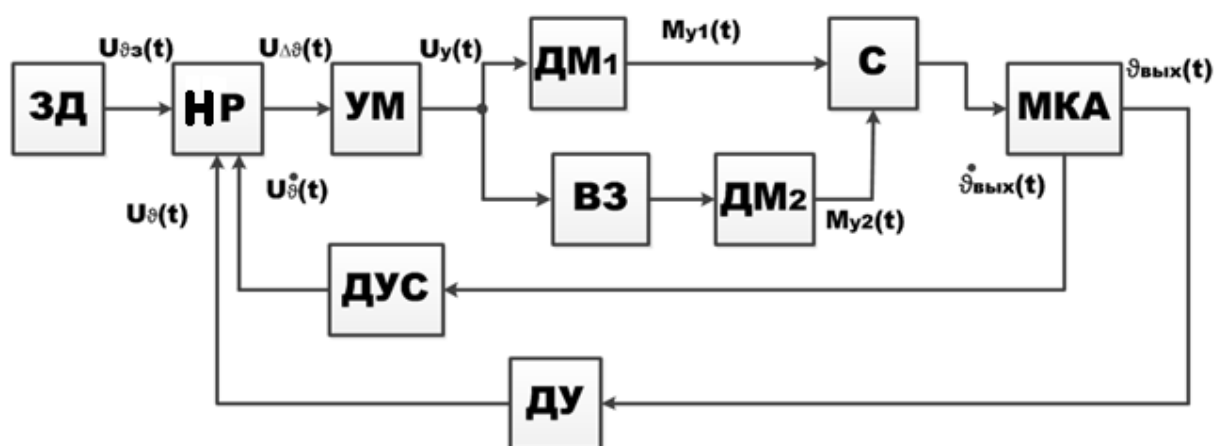


Рис. 3. Функциональная схема системы ориентации и стабилизации МКА с нечетким регулятором

Здесь введены следующие обозначения: ЗД – задающее устройство; НР – нечеткий регулятор; УМ – усилитель мощности; ВЗ – временная задержка; ДМ<sub>1</sub> – двигатель-маховик 1; ДМ<sub>2</sub> – двигатель-маховик 2; МКА – малый космический аппарат (объект управления); ДУС – датчик угловых скоростей; ДУ – датчик угла; С – сумматор.

Для решения поставленной задачи были получены соответствующие передаточные функции ДМ<sub>i</sub>, МКА и соответствующие коэффициенты передачи  $K_i, i=1, 4, 6$ . Для сравнения показателей качества на рис. 4 изображены в среде Matlab/Simulink схемы систем ориентации и стабилизации с ПД-регулятором и нечетким регулятором.

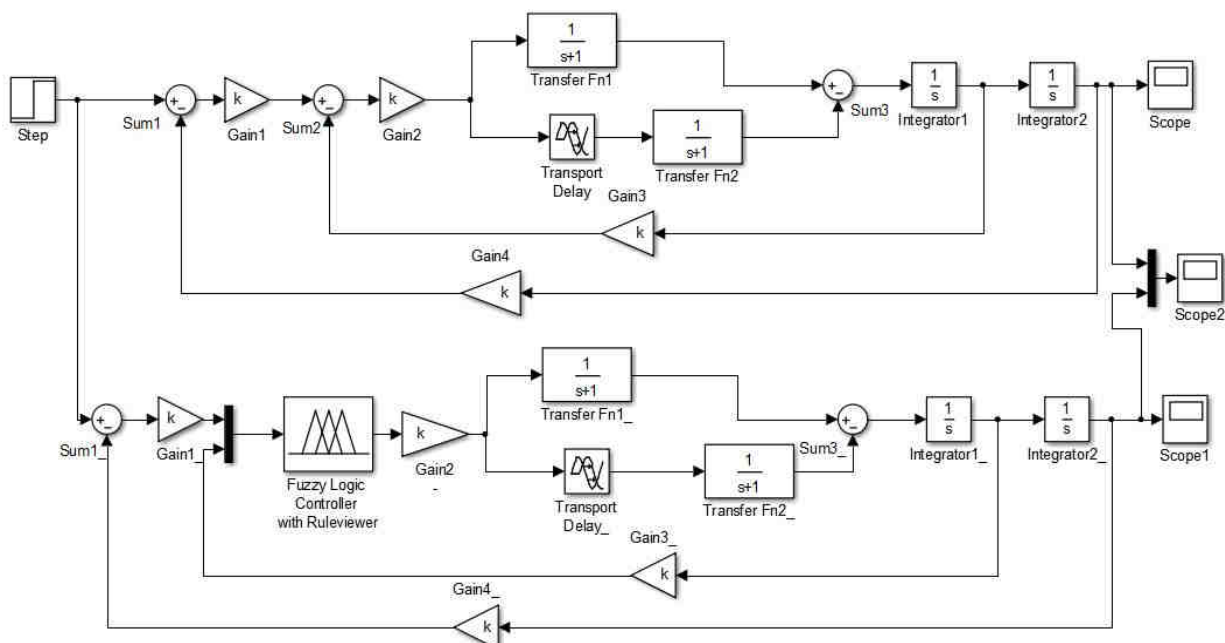


Рис. 4. Машинная модель исследуемой системы в среде Matlab/Simulink

На рис. 4 введены следующие обозначения:

Step – задатчик единичного ступенчатого воздействия; Gain<sub>i</sub>,  $i=\overline{1,4}$  – усилители; TransferFn<sub>i</sub>,  $i=\overline{1,4}$  – передаточные функции управляющего ДМ<sub>1</sub> и компенсирующего ДМ<sub>2</sub> двигателей маховиков; Integrator  $i=\overline{1,2}$  – блоки интегрирования; Scope – осциллограф; Transport Delay – временная задержка включения компенсирующего двигателя – маховика; Fuzzy Logic Controller with Rule viewer – нечеткий регулятор.

Для настройки нечеткого регулятора были выбраны в качестве входных лингвистических переменных сигнал ошибки (рассогласования) и выходной сигнал ДУС. В соответствии с данными входами были выбраны функции принадлежности, сформированы блоки входа (см. рис. 5), блок правил (см. рис. 6, а) и блок выхода (см. рис. 6, б). Результаты исследования СОС с ПД-регулятором и НР показаны на рис.7.

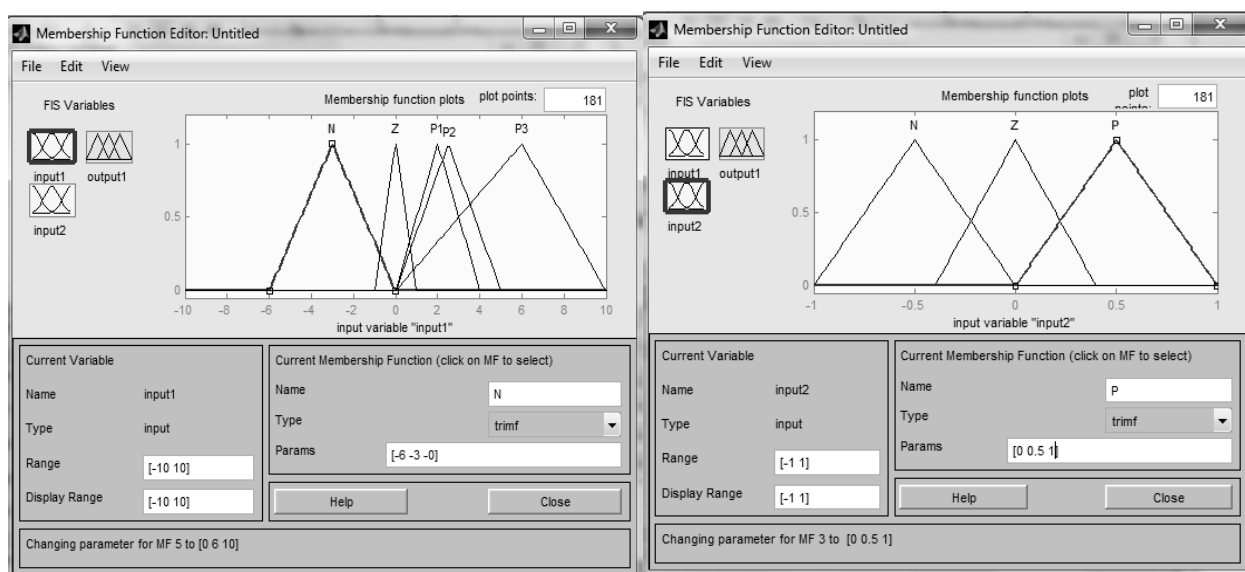


Рис. 5. Окна блоков входа нечеткого регулятора

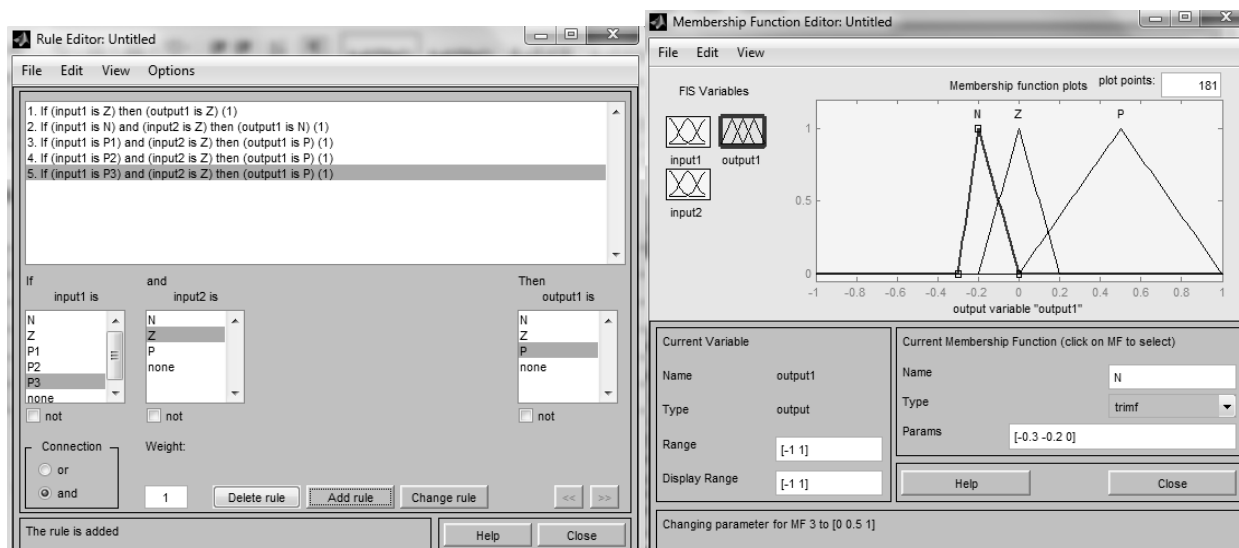


Рис. 6. Окна блоков настроек нечеткого регулятора:  
а – окно блока правил; б – окно блока выхода Output

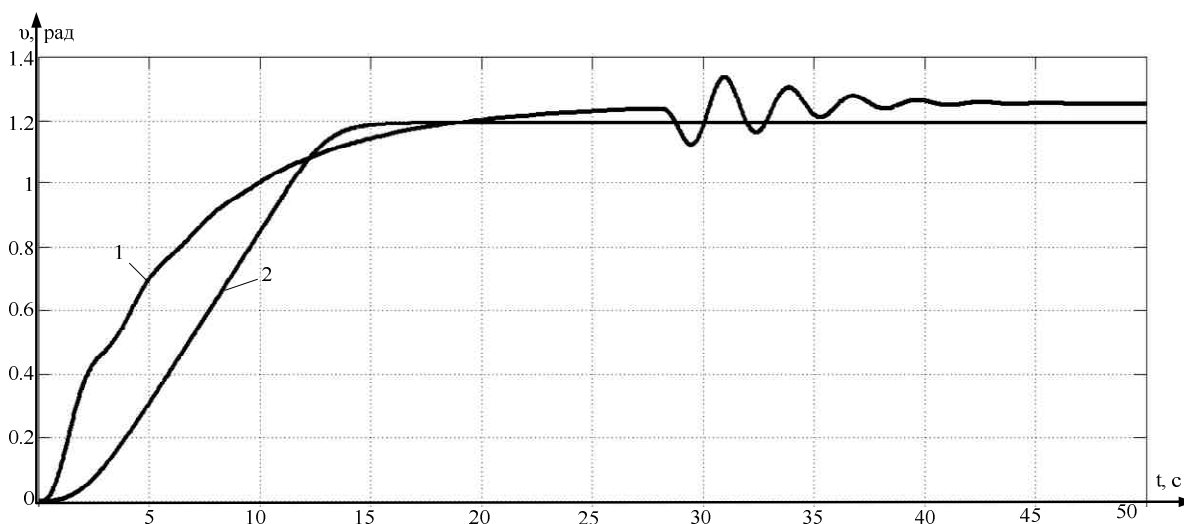


Рис. 7. Переходный процесс системы:  
1 – с ПД – регулятором; 2 – с нечетким регулятором

Как видно из графиков выходных сигналов, при одних и тех же условиях и задающих воздействиях включения и выключения двигателей – маховиков ДМ<sub>1</sub> и ДМ<sub>2</sub> наличие нечеткого регулятора позволяет получить плавный переходный процесс без перерегулирования и автоколебаний. Кроме того, изменение коэффициента в прямой цепи с нечетким регулятором вследствие, например, деградации отдельных функциональных элементов, менее сказывается на амплитуде и быстроте действия системы в целом, чем при наличии ПД-регулятора.

Осуществляя изменение времени включения компенсирующего двигателя – маховика ДМ<sub>2</sub>, можно при необходимости корректировать угол ориентации МКА (см. рис. 9) без значительного увеличения времени переходного процесса, без автоколебаний и перерегулирования, что особенно требуется при решении задач мониторинга земной поверхности и проходящих атмосферных явлений.

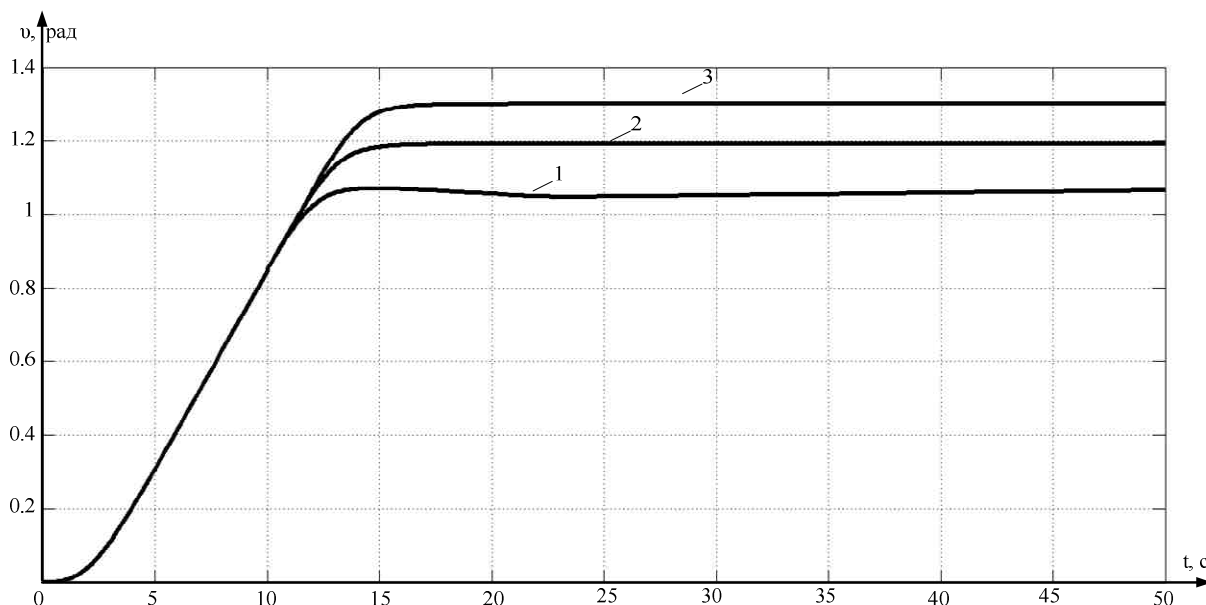


Рис. 9. Графики переходных процессов при различных значениях задержки:  
1 – 10 с; 2 – 11 с; 3 – 12 с

**Заключение.** Анализ принципов построения существующих систем и методов стабилизации и ориентации МКА в пространстве, основанных на использовании двигателей-маховиков, включенных по дифференциальной схеме, показал, что использование нечеткого регулятора по сравнению с классическим ПД - регулятором позволяет получить более качественные переходные характеристики, которым свойственны плавность, отсутствие колебательности в моменты включения и выключения компенсирующего двигателя маховика, а также корректировать требуемое время переходного процесса.

Величину углового поворота КЛА при наличии нечеткого регулятора легко корректировать, используя влияние корректирующего двигателя – маховика (см. рис. 9) и тем самым обеспечивать требуемую точность угловой ориентации.

### Список литературы

1. Суббота, А. М. Исполнительные органы систем управления малых космических аппаратов в рамках концепции "орбитальная группировка" [Текст] / А. М. Суббота, В. Ф. Симонов, И. В. Бычкова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 4. – С. 32 – 37.
2. Кулик, А. С. Эффективность избыточных систем стабилизации и ориентации космических аппаратов с двигателями-маховиками [Текст] / А. С. Кулик, А. М. Суббота, О. В. Резникова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №3 (50). – С. 18-25.
3. Суббота, А. М. Особенности применения двигателей-маховиков на малых космических аппаратах [Текст] / А.М. Суббота, О. В. Резникова, Т.Н. Андрущенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – №4(91). – С. 88 – 92.

4. Суббота, А. М. Разработка модели системы ориентации и стабилизации малых космических аппаратов [Текст] / А. М. Суббота, А. В. Красножен // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – №2(99). – С. 75-82.
5. Куленко, М. С. Исследование применения нечетких регуляторов в системах управления технологическими процессами [Текст] / М. С. Куленко, С. В. Буренин // *Вестник ИГЭУ*. В. №2 – 2010. – 5 с.
6. Гостев, В. И. Проектирование нечетких регуляторов и системы автоматического управления [Текст]: моногр. / В.И. Гостев. – Нежин: Аспект-Поліграф, 2009. – 416 с.
7. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy indification of systems and its applications to modeling and control. // *IEEETrans. Systems Man Cybernet*. – 1985. – Vol. 15. No. 116 – P. 116 – 132.
8. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976 – 165 с.
9. Кудинов, Ю.И. Нечеткие регуляторы и системы управления [Текст] // И.Н. Дорохов, Ф.Ф. Пащенко // *Controlscience*. – № 3. – 2004. С. 2 – 4.
10. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab [Текст] / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия. – 2007. – 288 с.

Поступила в редакцию 24.02.2017.

### **Застосування нечіткого регулятора для підвищення якості системи управління КЛА на базі двигунів-маховиків, включених за диференціальною схемою**

Досліджено питання створення системи стабілізації космічного літального апарата за допомогою двигунів-маховиків з диференціальною схемою включення. Аналіз принципів побудови існуючих систем виявив ряд істотних недоліків, які призводять до виникнення нутаційних коливань, появи насичення в двигунах-маховиках, а також неточності вироблення необхідного керуючого моменту. У зв'язку з цим у роботі запропоновано принцип побудови системи на базі нечіткого управління. Введено блок нечіткого регулятора, який дозволяє підвищити якість функціонування і збільшити точність орієнтації і стабілізації КА в просторі.

**Ключові слова:** система управління, малогабаритний космічний апарат, нечіткий регулятор, система орієнтації і стабілізації, двигуни-маховики, диференціальний режим.



## **Application of Fuzzy Control to Improve Quality of the Space AIR-CRAFT Control System's Based on the Flywheel Engine Included by Differential Circuit**

Investigate the problem create stabilization system of space aircraft using flywheel engines with differential circuit. Analysis construction principles of the existing systems identified a number of significant shortcomings. That lead to the emergence of nutation oscillations, saturation appearance in the flywheel engines, as well as inaccurate develop the required control torque. In this regard the construction principle system based on fuzzy control. There is a block of a fuzzy controller, which improves the functioning of the quality and accuracy of the spacecraft orientation and stabilization.

**Keywords:** control system, small-sized spacecraft, fuzzy control, orientation and stabilization system, engines, flywheels, differential mode.

### **Сведения об авторах:**

**Суббота Анатолий Максимович** – кандидат технических наук, доцент и профессор Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", профессор каф. 301 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", Украина.

**Джуглаков Виталий Георгиевич** – доцент каф. 301 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", Украина.

**Басова Анна Евгеньевна** – ассистент каф. 301 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", Украина.