

УДК 004.896: 681.51

О.В. Мнушка

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ АНТЕННЫ

Разработана имитационная модель спутниковой антенны по азимуту, в которой в качестве регулятора используют нечетко-логические контроллеры, полученные по алгоритмам Мамдани и Такаги-Сугэно. Проведено имитационное моделирование и сравнительный анализ систем управления с нечетко-логическими и традиционными ПИД-регуляторами. Полученные результаты показывают преимущество использования нечетко-логических контроллеров Такаги-Сугэно в качестве регуляторов в системах управления позиционированием спутниковой антенны.

Ключевые слова: нечеткая логика, система управления, позиционирование, регулятор, антенна.

Введение

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Спутниковые телекоммуникационные системы (СТС) широко используются в специальных и гражданских применениях. Несмотря на повышенный интерес в 1990-х годах к низкоорбитальным СТС, они оказались экономически невыгодными, поэтому СТС с размещением искусственных спутников Земли (ИСЗ) на геостационарной орбите остаются актуальными [1]. Такие системы обладают следующими преимуществами: глобальная зона покрытия; широкая полоса пропускания каналов связи (Ku, K и Ka-диапазоны), что делает их пригодными для широкополосного доступа в Интернет и цифрового телевидения; неизменная стоимость передачи данных на различные расстояния; малая вероятность ошибки и хорошо отработанные способы их устранения [2].

Развитие мобильных СТС, в том числе персональных систем, систем непосредственного вещания и широкополосного доступа (на основе VSAT (very small aperture terminal)) идет в направлении увеличения частотных диапазонов, что в свою очередь, налагает еще более жесткие требования к параметрам антенных установок (АУ), в том числе, к точности наведения АУ на ИСЗ и удержания АУ в направлении на ИСЗ в процессе движения транспортного средства (ТС) абонента СТС [3, 4].

Анализ исследований и публикаций.

В [5] рассматривают общие вопросы построения систем управления (СУ) наведением и слежением АУ применительно к стационарным СТС. Не рассматривают построение систем слежения АУ в процессе движения ТС. С увеличением рабочего частотного диапазона СТС требования к точности наведения антенны на ИСЗ вырастают на порядок. В настоящее время погрешность позиционирования АУ не должна превышать десятых долей градуса

(рис. 1) [3]. Для обеспечения такой точности требуются соответствующие СУ.

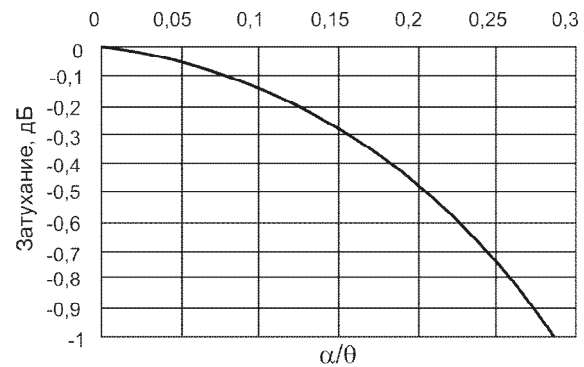


Рис. 1. Зависимость затухания сигнала в приемной антенне от ошибки позиционирования: α – отклонение от точки наведения, град, θ – ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны, град

Для следящих АУ подвижных СТС находят применение СУ на основе традиционных регуляторов (ПИ, ПД, ПИД), а также различные варианты робастных СУ [6 – 9].

В [10 – 12] рассматривают построение следящих АУ на основе алгоритма пошагового слежения и применения нечетко-логических (НЛ) контроллеров (НЛК) в качестве регулятора в системе позиционирования спутниковой антенны (СА).

В [10] проведено сравнение ПИД-регулятора и НЛ-регулятора для реализации двухосевой системы стабилизации и слежения для модифицированной промышленной антенны SeaTel 1898. Показано, что НЛ-регулятор проще в реализации и имеет преимущество перед ПИД-регулятором для устранения влияния комбинаций внешних возмущений.

В [11, 12] рассматривают применение НЛ-регуляторов для позиционирования СА в системах

слежения АУ в цепи обратной связи по уровню сигнала. Показаны преимущества применения таких регуляторов для малых изменений уровня сигнала и традиционных ПИД-регуляторов – для его больших изменений. Переход к НЛ-регуляторам позволяет добиться большей производительности системы.

В рассмотренных работах оценка носит больше качественный характер, не приводятся результаты анализа устойчивости полученных СУ к внешним воздействиям, т.к. этот вопрос имеет большое значение для оценки характеристик СУ, то он требует более подробного изучения.

Постановка задачи. Для наблюдателя с Земли направление на ИСЗ определяется двумя угловыми величинами – азимутом (Az) и углом места (El) [3]

$$\begin{aligned} Az &= \arctg(\operatorname{tg}\phi / \sin\psi), \\ El &= \arctg \frac{\cos\psi \sin\phi - r/R}{\sqrt{1 - (\cos\psi \cos\phi)^2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где угол ϕ – разность между долготой ИСЗ и ТС, град.; угол ψ широта ТС, град.; r – радиус Земли, км; R – расстояние до ИСЗ, км.

Изменение координат ТС в процессе движения требует постоянной коррекции азимута и угла места (1), что обеспечивается СУ следящих АУ. Процесс корректировки углов состоит в периодическом позиционировании АУ на основе данных о координатах ТС или при помощи слежения, когда для получения нового значения углов используются их предыдущие значения и дополнительная информация – уровень сигнала, BER и др.

В СУ АУ подвижных СТС применяют регуляторы на основе нечетко-логических контроллеров (НЛК), построенных по алгоритмам Mamdani (Мамдани, М-НЛК) и Takagi-Sugeno (Такаги-Сугэно, ТС-НЛК) [13]. Для реализации СУ наиболее часто используют управление по отклонению сигнала от требуемого значения (рис. 2).

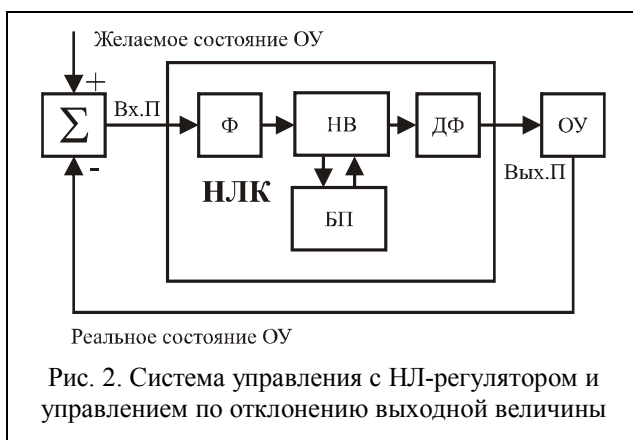


Рис. 2. Система управления с НЛ-регулятором и управлением по отклонению выходной величины

На вход СУ поступают два сигнала – сигнал желаемого состояния обобщенного объекта управления (ОУ) и сигнал реального состояния ОУ, кото-

рые являются входными переменными (Вх.П) для НЛК. В НЛК происходит процесс фаззификации (Ф), нечеткого вывода (НВ) на основе базы правил (БП), дефаззификации (ДФ) и формирования управляющего воздействия (Вых.П) для корректировки состояния ОУ.

В общем случае в качестве обобщенного ОУ выступает система, состоящая из антенны (нагрузки), редуктора, двигателя и преобразователя.

Для регулировки углового положения антенны по азимуту и углу места используют аналогичные СУ, поэтому для оценки характеристик такой СУ достаточно моделирования одной из систем.

Цель исследования. Разработка имитационной модели (ИМ) и имитационное моделирование системы управления позиционированием спутниковой антенны (СА) по азимуту.

Изложение материала и результатов

1. Построение нечеткого регулятора.

Для реализации в НЛК управления по отклонению выходной величины продукции базы правил строят с использованием лингвистических переменных, характеризующих отклонение реального ($\Delta e(k)$) и желаемого ($e(k)$) состояний объекта, и явным включением в СУ желаемого состояния ОУ при помощи задающего устройства ($r(k)$) (2). Отметим, что значения отнесенные к входу НЛК, относятся к четкому множеству.

$$\begin{aligned} e(k) &= r(k) - y(k), \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1), \end{aligned} \quad (2)$$

где $e(k)$, $r(k)$, $y(k)$, $\Delta e(k)$ – ошибка, управляющее воздействие по входу, текущее состояние по выходу, изменение ошибки значения выходного сигнала, соответственно; k – номер итерации.

Для реализации М-НЛК наиболее часто используют треугольную функцию принадлежности (ФП) лингвистических переменных (ЛП) (3), для ТС-НЛК – гауссову ФП (4)

Треугольная функция принадлежности

$$\mu_T(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c; \\ 0, & c \leq x, \end{cases} \quad (3)$$

где $[a, c]$ – интервал изменения переменной x ; b – наиболее возможное значение x .

Гауссова функция принадлежности

$$\mu_G(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \quad (4)$$

где b – координата максимума функции принадлежности; c – коэффициент концентрации функции принадлежности.

Для синглтонных моделей нечеткого логического вывода изменение управляющего воздействия $\Delta U(k)$ (5) определяют по методу центраида (Center of Area, Center of Gravity) [14]

$$\Delta U(k) = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_j(\Delta u_j) \Delta u_j}{\sum_{j=1}^m \mu_j(\Delta u_j)}, \quad (5)$$

где Δu_j – изменение значения выходной переменной НЛК.

Построим ИМ нечетко-логического регулятора, реализующего ПИД-закон регулирования (рис. 3).

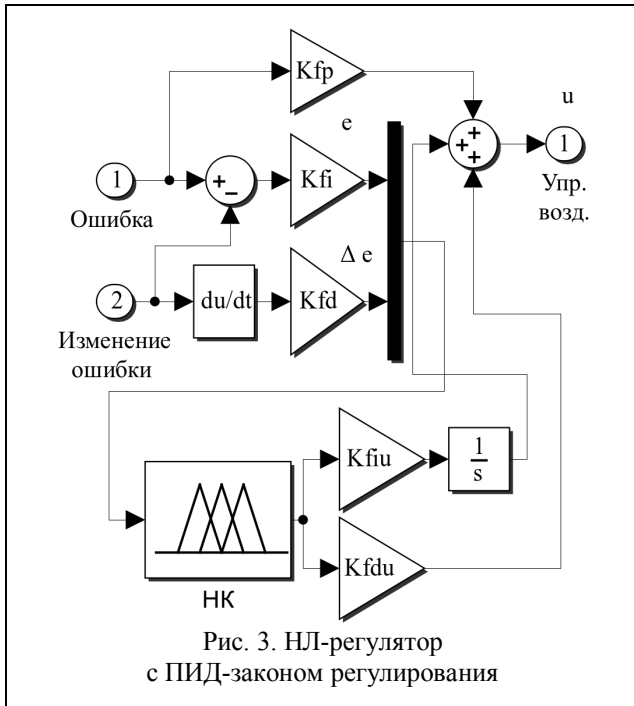


Рис. 3. НЛ-регулятор с ПИД-законом регулирования

НЛ-регулятор состоит из:

а) входных усилителей (аналогичных по назначению в традиционных ПИД-регуляторах) пропорционального звена (K_{fp}), интегрального звена (K_{fi}), дифференциального звена (K_{fd}), а также выходных усилителей (K_{fui} , K_{fdu});

б) нечетко-логического контроллера;

в) дифференциатора для выделения Δe ;

г) интегратора для реализации ПИ-закона регулирования; д) вспомогательных элементов – сумматоров и мультиплексора.

В соответствии с [15, 16] для схемы (3) должны выполняться следующие отношения

$$\begin{aligned} K_p &= K_{fui} K_{fd} + K_{fdu} K_{fi}, \\ K_i &= K_{fui} K_{fdu}, \\ K_d &= K_{fdu} K_{fd}, \end{aligned} \quad (6)$$

где K_p , K_i , K_d – коэффициенты усиления пропор-

ционального, интегрального и дифференциального звена традиционного ПИД-регулятора.

Для М-НЛК определим две входных ЛП с ФП (2) (ошибка $e(k)$ и изменение ошибки $\Delta e(k)$), и одну выходную ЛП (управляющее воздействие $u(k)$) с ФП (2) в виде синглтона ($a = b = c$), связанные между собой набором правил, в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Набор правил М-НЛК

$\Delta u(k)$		$e(k)$		
		О	Н	П
$\Delta e(k)$	О	БО	СО	Н
	Н	СО	Н	СП
	П	Н	СП	БП

Входные ЛП принимают три значения: «Отрицательный» (О), «Ноль» (Н) и «Положительный» (П); а выходная – пять: «Большой отрицательный» (БО), «Средний отрицательный» (СО), «Ноль» (Н), «Средний положительный» (СП), «Большой положительный» (БП). В соответствии с [17] такой НЛК должен обеспечивать достаточно хорошие характеристики.

Для ТС-НЛК определим две входных ЛП с ФП (3), которые могут принимать два значения: «Положительный» (П) и «Отрицательный» (О) и выходную переменную, принимающую константные значения: «Минимальный» (Мин) (табл. 2).

Таблица 2

Набор правил ТС-НЛК

$\Delta u(k)$		$e(k)$	
		О	П
$\Delta e(k)$	О	Мин	Н
	П	Н	Мах

2. Обобщенный объект управления.

В [18] рассматривают СУ позиционирования спутниковой антенны по азимуту (рис. 4).

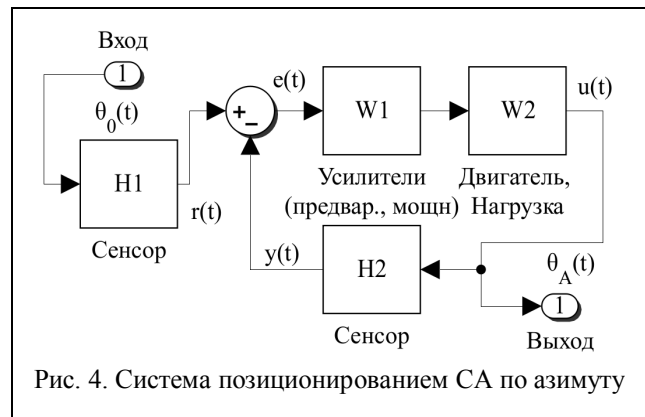


Рис. 4. Система позиционирования СА по азимуту

На рис. 4 обозначены:

а) W1 – предварительный усилитель и усилитель мощности;

б) W2 – двигатель, передача и нагрузка (СА);
 в) Н1, Н2 – сенсоры (потенциометры), Н1 – для преобразования значения заданного угла поворота в напряжение (управляющее воздействие по входу), Н2 – для измерения текущего углового положения СА; г) $\theta_0(t)$ и $\theta_A(t)$ – заданное и измеренное текущее значение угла поворота антенны, соответственно.

Передаточная функция замкнутой СУ

$$W_{CL}(s) = \frac{W_{OL}(s)}{1 + W_{OL}(s)H_2(s)}, \quad (7)$$

где $W_{OL}(S) = \frac{K_p K_{pa} K_m K_g}{s(s+a)(s+a_m)}$ – передаточная функция разомкнутой СУ; K_p – коэффициент предварительного усилителя; K_g – коэффициент передачи редуктора; K_{pa} и a – параметры передаточной функции усилителя мощности; K_m , a_m – параметры передаточной функции двигателя, зависящие от конструкции и параметров двигателя и параметров нагрузки.

Анализ переходной характеристики полученной СУ (7) показывает, что длительность переходного процесса около 4,35 с и перерегулирование ~35%, поэтому для улучшения ее параметров требуется дополнительный регулятор.

3. Имитационное моделирование.

Разработана ИМ дискретной СУ позиционированием СА (рис. 5), которая состоит из:

- а) источника входного сигнала («Сигнал»);
- б) генератора помехи («Помеха»);
- в) СУ с традиционным ПИД-регулятором («PID»);
- г) СУ с М-НЛК («FLC(linear)»);
- д) СУ с ТС-НЛК («FLC(nonlin)»);
- е) дискретным ПИД-регулятором из библиотеки Simulink («PID(z)»);
- ж) сенсоров («Sensor»);
- з) обобщенного ОУ («ContrObject»).

Для настройки ПИД-регуляторов были использованы средства Matlab (*pidtune()*) и Simulink (*Control Design PID Tuner*), а для настройки НЛ-регуляторов – отношения (6). Соответствующие коэффициенты для шага дискретизации $T_s = 0,01$ и входного сигнала с амплитудой A равной 10 (что соответствует повороту на антенны на 180^0):

- а) ПИД-регулятор (*pidtune()*): $K_p = 2,32$; $K_i = 0,393$; $K_d = 0,424$;
- б) модуль *Pid(z)* (Simulink): $K_p = 0,9665$; $K_i = 0,0267$; $K_d = 0,3819$;
- в) НЛ-регуляторы: $K_{fi} = 3,18$; $K_{fd} = 0,6007$; $K_{fiu} = 0,1237$; $K_{fdu} = 0,7055$.

Для приведенных в [18] параметров двигателя и антенны (нагрузки) получена передаточная функция (8) обобщенного объекта управления и замкнутой СУ без регулятора:

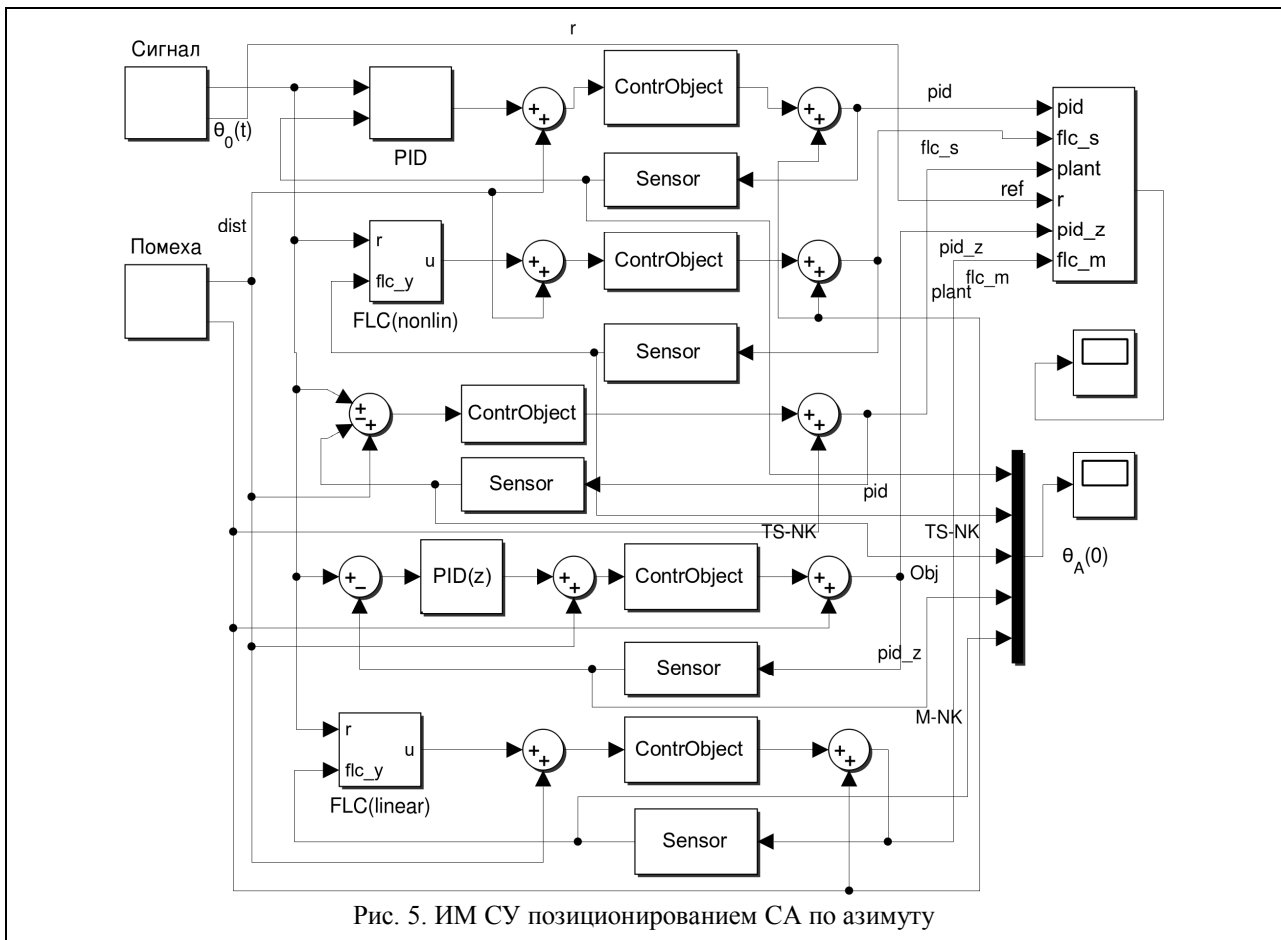


Рис. 5. ИМ СУ позиционированием СА по азимуту

$$W_{OL}(z) = \frac{0,000274(z + 2,959)(z + 0,2037)}{(z - 1)(z - 0,983)(z - 0,3679)},$$

$$W_{CL}(z) = \frac{0,012248(z + 2,959)(z - 0,9982)}{(z - 0,9982)(z - 0,3988)(z + 0,005838)} \times \frac{(z - 0,9497)(z + 0,2037)}{(z^2 - 1,956z + 0,9574)} \quad (8)$$

Анализ переходной характеристики (рис. 6) показывает, что перерегулирование для СУ без регулятора ~35%, с регулятором М-НЛК составляет ~18%, с регулятором ТС-НЛК ~8%.

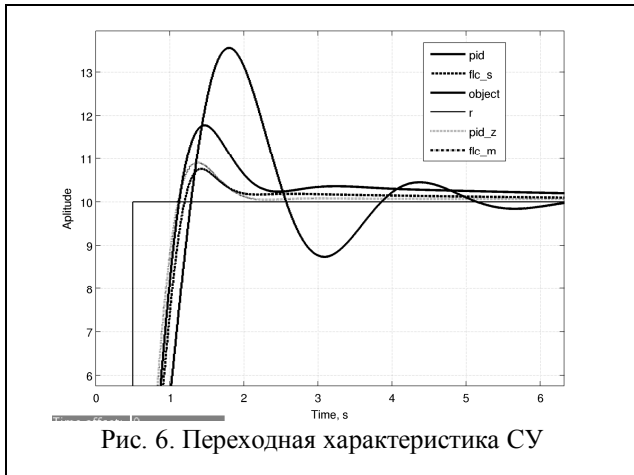


Рис. 6. Переходная характеристика СУ

Проведено моделирование влияния помех различной природы на переходную характеристику СУ, находящуюся в установившемся режиме (рис. 7)

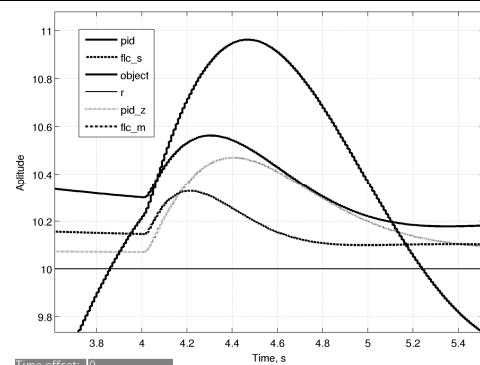
При воздействии на ОУ ступенчатого воздействия (рис. 7, а) с амплитудой $0,15 \cdot \max(A)$ регулятор ТС-НЛК привел систему в прежнее положение за ~0,9 с, регулятор М-НЛК и оба ПИД-регулятора за ~1,5 с. При этом в СУ с регулятором ТС-НЛК изменение амплитуды составило ~0,015 А, а для других контроллеров в два раза больше.

При воздействии на ОУ короткой импульсной помехи большой амплитуды (рис. 7, б, длительность $2T_s$, амплитуда $0,3 \cdot \max(A)$), регулятор ТС-НЛК привел систему в прежнее положение за время ~1 с, остальные – более чем за 1,5 с.

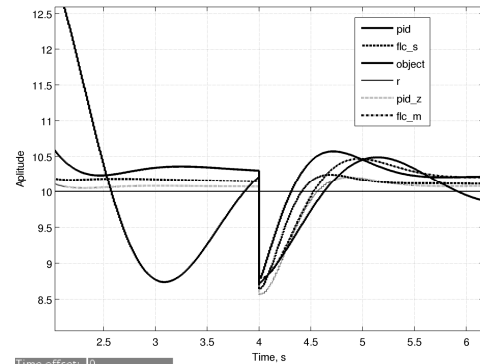
При воздействии на ОУ линейной монотонно растущей помехи (рис. 7, в), с момента подачи входного воздействия, для СУ с регулятором ТС-НЛК перерегулирование составило ~10%, для СУ с регулятором М-НЛК и традиционным ПИД-регулятором ~18%, СУ с регулятором Pid(z)-контроллер не справился с таким воздействием. При изменении передаточной характеристики ОУ (добавлении последовательно с ОУ звена $1/(z \pm \alpha)$, рис. 8) наиболее устойчивой оказалась СУ с регулятором ТС-НЛК.

Выводы и направление дальнейших исследований

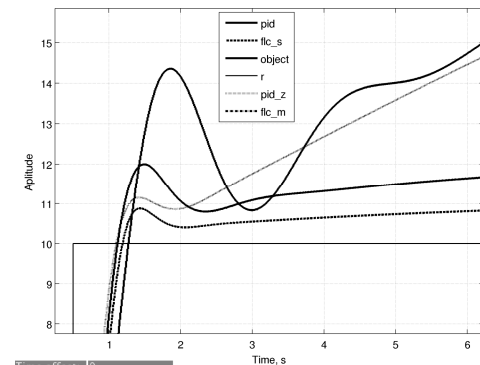
Полученные в результате моделирования результаты показывают, что преимущества НЛ-регуля-



а



б



в

Рис. 7. Реакция СУ на воздействие: а – ступенчатое ; б – импульсное; в – линейное, монотонно возрастающее

торов (особенно, ТС-НЛК), по сравнению с традиционными ПИД-регуляторами, проявляются при воздействии на ОУ внешних воздействий, приводящих, в т.ч., и к изменению передаточной характеристики ОУ.

Настройка НЛ-регуляторов в соответствии с (5) обеспечивает быструю первоначальную настройку и стабильную работу НЛ-регуляторов обоих типов. Требуют дальнейшего исследования вопросы о влиянии числа правил и вида функции принадлежности на параметры НЛ-регулятора и целесообразности дополнительного обучения НЛ-регулятора.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке СУ следящих АУ, для позиционирования которых необходимо совершать угловые перемещения антенны в двух (трех) плоскостях, что соответствует ее установке на подвижном транспортном средстве.

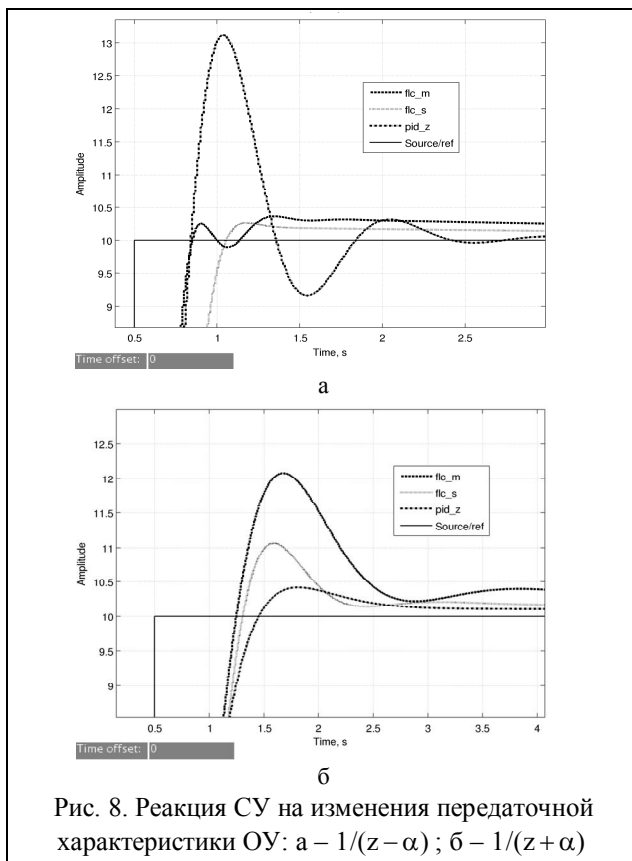


Рис. 8. Реакція СУ на змінення передаточної характеристики ОУ: а - $1/(z - \alpha)$; б - $1/(z + \alpha)$

Список литературы

1. Крылов А. Анализ создания и развития низкоорбитальных систем спутниковой связи [Текст] / А. Крылов // Спутниковая связь и вещание. – 2011. – С. 46-49.
2. Спутниковая связь и вещание: Справочник [Текст] / [В. А. Бартеев, Г. В. Болотов, В. Л. Быков и др.] ; под ред. Л. Я. Кантора. – М. : Радио и связь, 1997. – 528 с.
3. Riling D. The Evolution of U.S. Naval Satellite Systems Antenna Control Technology [Текст] / Dave Riling // Naval Engineer. J. – 1994. – Vol. 106. – P. 94-107.
4. RaySat and RaySat Antenna Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.raysat.com>.
5. Белянский П.В. Управление наземными антеннами и радиотелескопами / П.В. Белянский, Б.Г. Сергеев. – М. : Сов. радио, 1980. – 280 с.
6. Debruin J. Control Systems for Mobile Satcom Antennas [Текст] / Debruin J. // Control Systems, IEEE. – 2008. – Vol. 28, No 1. – P. 86-101.
7. Gawronski W. Antenna Control Systems: from PI to H_∞ [Текст] / Gawronski W. // Anten. and Propag. Mag. – 2001. – Vol. 43. – No 1. – P. 52-60.
8. Jiang J. Desired Compensation Adaptive Robust Control of Mobile Satellite Communication System with Disturbance and Model Uncertainties [Текст] / [J. Jiang, Q. Chen, B. Yao, J. Guo]. – Int. J of Innov. Comp., Informat. and Contr. – 2013. – Vol. 9. – No 1. – P. 153-164.
9. Palamar M. Neurocontroller to Tracking Antenna Control of Information Reception from Earth Remote Sensing Satellites [Текст] / Palamar M. // Intel. Data Acquis. and Adv. Comp. Syst.: Techn. and Appl. – 2005. – P. 340-344.
10. Kim J.-K. Simplified Fuzzy-PID Controller of Data Link Antenna / J.-K. Kim, S.- H. Park, T. Jin // Q. Yang, G. Webb (Eds.) : PRICAI 2006, LNAI. – Springer, 2006. – P. 1083 – 1088.
11. Lin J.-M. Intelligent PD-type Fuzzy Controller Design for Mobile Satellite Antenna Tracking System with Parameter Variations Effect [Текст] / J.-M. Lin, Po-K. Chang // IEEE Sym. on Comp. Intel. in Contr. and Autom. – 2011. – P. 1-5.
12. Chag P.-K. Integrating traditional and fuzzy controllers for mobile satellite antenna tracking system design / Po-K. Chang, J.-M. Lin // Select. Pap. from: Comm. & Inf. Techn. 2008, Circ., Syst. and Sign. 2008, Appl. Math., Simul., Model. 2008. – Greece, 2008. – P. 102-108.
13. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
14. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Текст] / С.Д. Штовба – Винница, 2001. – 198 с.
15. Zheng L., A Practical Guide to Tune of Proportional and Integral (PI) Like Fuzzy Controllers [Текст] / L. Zheng // IEEE Int. Conf. on Fuzzy Syst. – 1992. – P. 633-640.
16. Han-Xiong L. Conventional fuzzy control and its enhancement [Текст] / Han-Xiong Li; H. B. Gatland // IEEE Tran. on Syst., Man, and Cyber., Part B: Cybernetics. – 1996. – Vol. 26. – No 5. – P. 791-797.
17. Petil S. Low Cost Fuzzy Controllers for Classes of Second-Order Systems [Текст] / S. Preitl, Z. Preitl, R.-E. Precup // Proc. 15th IFAC World Cong. – 2002. – P.P. 66-71.
18. Nise N. Control Systems Engineering [Текст] / N. Nise. – Wiley, 2011. – 944 p.

Поступила в редколлегию 27.11.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. Д. Сахацкий, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯМ СУПУТНИКОВОЇ АНТЕНИ

О.В. Мнушка

Розроблено імітаційну модель СУП спутникової антени за азимутом, в якій у якості регулятора використовують контролери з нечіткою логикою, побудованими за алгоритмами Мамдані та Такагі-Сугено. Проведено імітаційне моделювання та порівняльний аналіз систем управління з нечітким і традиційним ПІД-регуляторами. Отримані результати показують переваги використання нечітко-логічних контролерів Такагі-Сугено у якості регулятора для системи управління позиціонуванням спутникової антени.

Ключові слова: нечітка логіка, спутникова антена, система управління, позиціонування, регулятор.

SIMULATION MODEL OF FUZZY CONTROL SATELLITE ANTENNA POSITION SYSTEM

O.V. Mnushka

The simulation model of a satellite antenna azimuth position control system with fuzzy logic controllers, obtained in accordance to algorithms Mamdani and Takagi-Sugeno, was obtained. Simulation and comparative analysis of control systems with fuzzy and conventional PID controllers was carried out. The results show the advantage of using fuzzy controllers of Takagi-Sugeno for satellite antenna azimuth positioning system.

Keywords: fuzzy logic, satellite antenna, control system, positioning, controller.