Методика исследования параметров нечеткого логического регулятора, обеспечивающих устойчивое управление углом атаки сверхмалых космических аппаратов

Technique for studying the parameters of a fuzzy logic controller providing stable control of the ultra-small spacecraft angle of attack

Краснощеков / Krasnoshchekov S.
Сергей Николаевич
(vka@mil.ru)
кандидат военных наук.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского» МО РФ,
старший научный сотрудник лаборатории (научно-исследовательской).
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: сверхмалый космический аппарат – mini spacecraft; нечеткий логический регулятор – fuzzy logic controller; система управления – control system; программно-моделирующий комплекс – software simulation suite.

В статье описана методика исследования параметров нечеткого логического регулятора системы управления сверхмалого космического аппарата, обеспечивающих устойчивое изменение угла атаки на требуемое значение. Представлены результаты численного моделирования.

The article describes a technique for studying the parameters of a fuzzy logic controller of the control system of an ultra-small spacecraft, providing a steady change in the angle of attack to the required value. The results of numerical simulation are presented.

Введение

Системы управления с нечеткими регуляторами представляют собой сложные объекты, которые реализуют нелинейные отображения входных сигналов в выходные [1]. При колебании значений входных сигналов возникает задача определения области устойчивости, которую в случае наличия в контуре системы управления блоков нечеткого логического вывода можно отнести к трудноразрешимой проблеме [2, 3]. Отмечено [4], что в случаях, когда математическая модель объекта управления слабоформализуема или неизвестна, то исследование устойчивости системы управления имеет смысл проводить на компьютерных имитационных моделях.

В статье описана методика исследования параметров нечеткого логического регулятора (НЛР), обеспечивающих требуемое устойчивое изменение угла атаки сверхмалого космического аппарата СМ КА. При необходимости изменения угла атаки на требуемое значение НЛР может быть настроен на соответствующие коэффициенты усиления.

Представленная методика опираются на метод анализа устойчивости [1] с использованием компьютерной модели системы [5].

Постановка задачи

Основная идея подхода к анализу устойчивости систем с блоками НЛР в контуре объекта управления СМ КА, на который опирается методика, заключается в следующем.

Предполагается, что задан конкретный СМ КА. Для него определены функциональные задачи, массогабаритные характеристики, структура НЛР в контуре системы управления, параметры орбиты, а также ограничения на время переходного периода и размеры области допустимых отклонений при изменении угла атаки.

Основная задача заключается в разработке методики исследования параметров НЛР, обеспечивающих устойчивое управление углом атаки сверхмалых космических аппаратов, на основе характеристик СМ КА.

Основными шагами методики являются.

1. Задание исходных данных процесса моделирования.

Исследование устойчивости проводится на имитационной модели, описанной в [5], которая настраивается со следующими исходными данными:

1 2022.indd 130 24.03.2022 15:10:46

· общие константы;

· параметры модели силы аэродинамического сопротивления;

· параметры СМ КА;

· характеристики блока СМ КА (тип “CubeSut 3U”);

· диапазон $[t_0\ t_m]$ и шаг времени (Δt) моделирования;

· время переходного процесса (t_p) и параметры области допустимых отклонений угла атаки (Δu).

2. Подготовка исходных данных плана имитационных экспериментов.

План экспериментов должен из себя представлять матрицу, состоящую из коэффициентов усиления НЛР и соответствующих им диапазонов изменения угла атаки. Процесс формирования такой матрицы состоит из следующих шагов:

· формирование множества значений изменения угла атаки

$$U = \{u_i | u_p > u_s,\ p > s,\ i = 1(1)n\},$$

· для каждого $u \in U$ по методике [5] определяем значения коэффициентов усиления НЛР (пропорциональный – k_e и дифференциальный – k_{de}).

$$K = \{\langle k_e\ k_{de}\rangle_i | \forall u_i \in U,\ k_e \in K_e,\ k_{de} \in K_{de},\ i = 1(1)n\},$$

обеспечивающих переход за требуемое время (t_p) на заданный угол (u_i) с точностью определенной областью допустимых отклонений $(u_i - \Delta u,\ u_i + \Delta u)$:

· объединяя U и K, получаем матрицу исходных данных НЛР

$$C = [U \quad K] \in M_{nm}(F),\ n = card(U),\ m = 3;$$

· определяем массив диапазонов, исследуемых на устойчивость значений изменения угла атаки.

Матрицу C представим в виде вектора столбца кортежей

$$C = [\langle u, k_e, k_{de}\rangle_i] \in M_{n1}(F) \forall u \in U, \langle k_e, k_{de}\rangle \in K,\ i = 1(1)n.$$

Тогда для каждого элемента матрицы $c_i \in C$ определяем вектор-столбец D_i, который представляет собой множество исследуемых на устойчивость значений изменения угла атаки

$$D = [D_i \in M_n(F)] = [d_{ji}] \in M_{mn}(F),$$

где $d_{ji} = d_0 + \Delta d(j-1),\ i = 1(1)n,\ j = 1(1)m$,

при этом:

– угол u_i лежит в середине исследуемого диапазона

$$\forall u_i = d_k \in D_i\ i = 1(1)n;\ k = (m+1)/2;\ m \bmod 2 = 1,$$

– пересечение диапазонов углов не равно пустому множеству

$$D_p \cap D_l \neq \varnothing,$$

т.е. концы рядом стоящих диапазонов перекрываются

$$\max(D_p) > \min(D_s) \quad p < s.$$

В итоге получим результирующую матрицу исходных данных плана имитационных экспериментов в следующем виде

$$Isx = \begin{bmatrix} C^T \\ D \end{bmatrix} \in M_{(m+3)n}(F).$$

1. Моделирование процесса изменения угла атаки.

Для данных Isx на интервале $[t_0\ t_m]$ с шагом Δt моделируем процесс изменения угла атаки СМ КА.

В результате формируем трехмерную матрицу результатов моделирования (R), в которой каждому элементу матрицы Isx определен вектор значений угла атаки (r_i), т.е.

$$R = \left\{ r_{ijt} \left| \begin{array}{c} \forall c_i = \langle u, k_e, k_{de}\rangle_i \in C\ i = 1(1)n \quad n = card(U) \\ \forall d_j \in D_i \quad D_i \in D\ j = 1(1)m \quad m = card(D_i) \\ t = 1(1)p \quad p = \dfrac{t_m - t_0}{\Delta t} + 1 \end{array} \right. \right\}.$$

2. Построение областей устойчивости.

Для построения областей устойчивости выделим из матрицы R срез данных, соответствующих времени моделирования $t \geq t_p$, с шагом Δt.

$$R^s = R(\{:\}, \{:\}, \gamma) \quad \gamma \subseteq \left\{ \gamma_1(1)\gamma_2 \left| \gamma_1 = \left(\frac{t_m - t_p}{\Delta t} + 1\right), \gamma_2 = \left(\frac{t_m - t_0}{\Delta t} + 1\right) \right. \right\}$$

Значения матрицы углов R^s нормализуем в матрицу R^n таким образом, чтобы значения попадающие в область допустимых отклонений $(u_i - \Delta u,\ u_i + \Delta u)$ попадали в область $[0, 1]$.

$$R^n = \left\{ r^n_{ijt} \left| \begin{array}{c} r^n_{ijt} = \dfrac{r^s_{ijt} - (d_j - \Delta u)}{2 \cdot \Delta u} \\ \forall c_i = \langle u, k_e, k_{de}\rangle_i \in C \quad i = 1(1)n \quad n = card(U) \\ \forall d_j \in D_i \quad D_i \in D \quad j = 1(1)m \quad m = card(D_i) \\ t = 1(1)p \quad p = \dfrac{t_m - t_p}{\Delta p} + 1 \end{array} \right. \right\}.$$

Делаем срез матрицы R^n по каждому варианту D_i

$$R^n_i = R^n(\{:\}, \{j\}, \{:\}) = \left\{ r^n_i \left| \begin{array}{c} j = 1(1)m \quad m = card(D_i) \\ D_i \in D \quad i = 1(1)n \quad n = card(U) \end{array} \right. \right\}.$$

1 2022.indd 131 24.03.2022 15:10:51

В результате получаем матрицы с нормированными значениями угла атаки для каждого варианта из диапазона D_i, соответствующего кортежу $c_i = \langle u, k_e, k_{de} \rangle_i$

$$R_i^n = M_{kp}(F)\text{, где } k = card(D_i), \quad p = \frac{t_m - t_p}{\Delta t} + 1 .$$

Если выразить значения матрицы R_i^n как функциональную зависимость от времени и номера варианта диапазона D_i, то можно построить трехмерный график. Выделяя изохроны [6] функции, соответствующие уровням [0; 1], и проецируя их на область определения (t, D_i), получим выделенную контурными линиями область допустимых отклонений. Очевидно, что если значение функции (угла атаки) попадает в эту область на всем временном отрезке $\left(\forall t \in [t_p, t_m]\right)$, то коэффициенты $\langle k_e, k_{de} \rangle_i$ обеспечивают устойчивый переход на угол атаки из D_i.

3. Анализ области устойчивости.

При необходимости расширения области устойчивости необходимо вернуться на шаг 2.

Исходные данные численного моделирования

Моделирование проводилось на программном комплексе имитационного моделирования [7], в который включены дополнительно разработанные блоки, обеспечивающие:

- задание исходных данных моделирования.
- формирование вектора U заданных значений угла атаки (табл. 1);
- применение методики оптимизационного моделирования [5], чтобы для каждого значения вектора U определить коэффициенты усиления (*Ke, Kde*) НЛР. Представлены в табл. 1;
- формирование матрицы диапазонов исследуемых на устойчивость значений углов атаки (D) (табл. 1).

Общие константы	
Средний радиус Земли, $R_з$	6371.0 (км)
Гравитационная постоянная Земли (ПЗ-90.11), μ	398600.4418 $(км^3/c^2)$
Параметры модели силы аэродинамического сопротивления	
Коэффициент неупругого столкновения, α	0.1
Высота орбиты, h	300 (км)
Плотность атмосферы (ГОСТ 4401-81), ρ	Стандартная атмосфера $(кг/м^3)$
Параметры СМ КА	
Коэффициент аэродинамического сопротивления, C_a	2.0
Тензор инерции, J	[0 0 0.0112] $(кг \cdot м^2)$
Характеристики блока (тип “CubeSut 3U”)	
Линейные размеры	0.1x0.1x0.3 (м)
Площадь центрального блока, $S_{ЦБ}$	0.03 $(м^2)$
Площадь торцевого блока, $S_{ТБ}$	0.01 $(м^2)$
Время моделирования, t_m	180 (с)
Шаг времени моделирования, Δt	1 (с)
Время переходного процесса, t_p	120 (с)
Радиус области допустимых отклонений, Δu	1 (град)

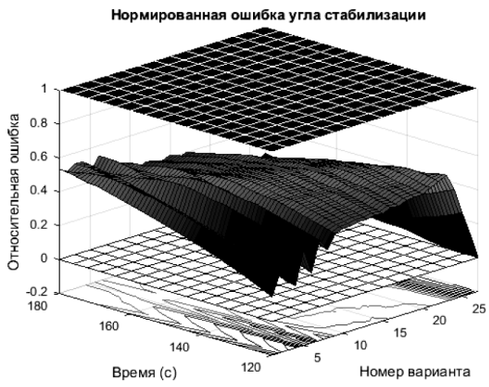
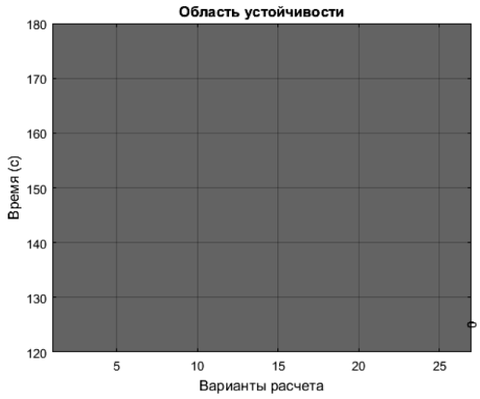
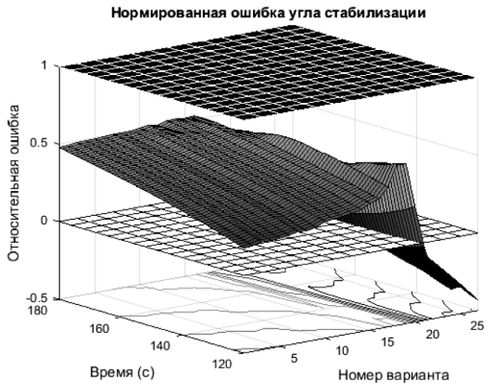
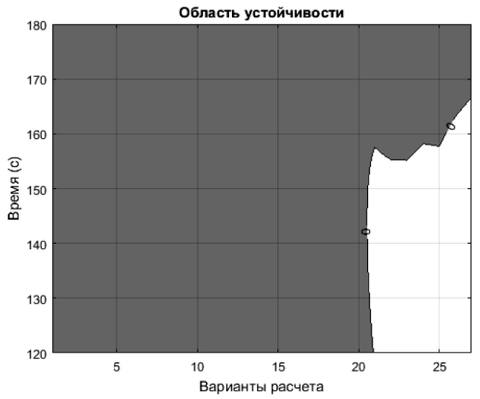
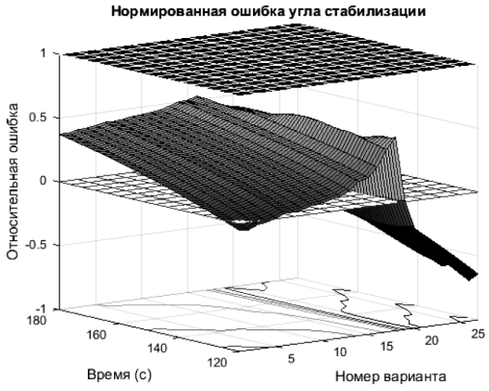
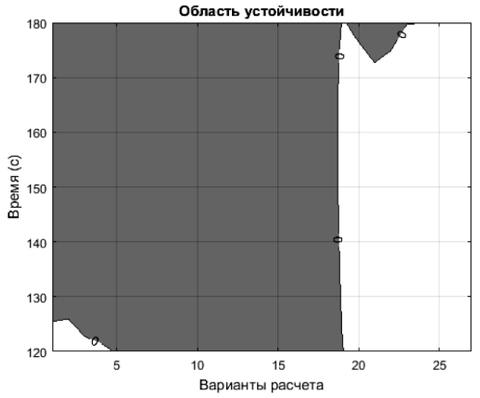
1 2022.indd 132 24.03.2022 15:10:55

Таблица 1

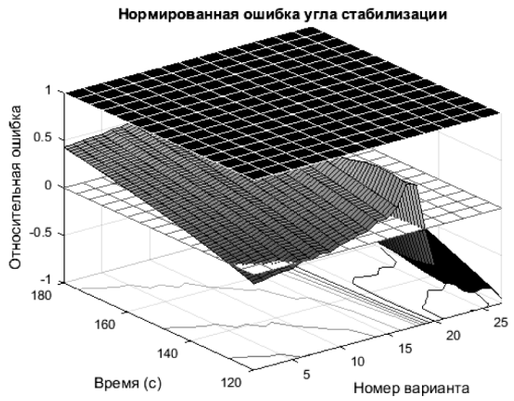
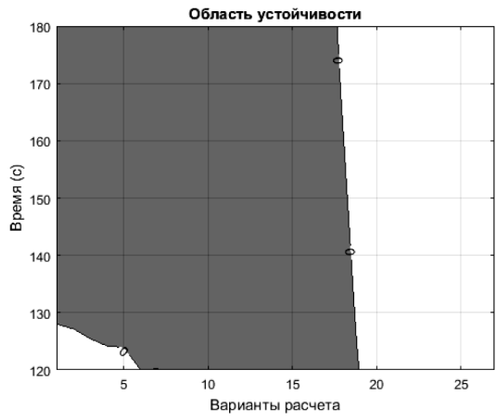
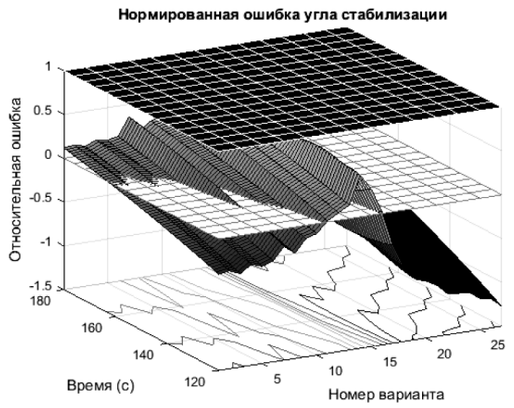
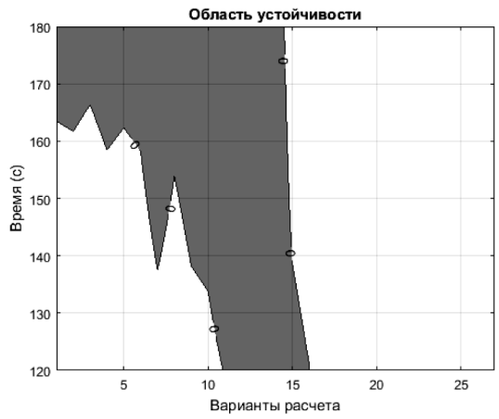
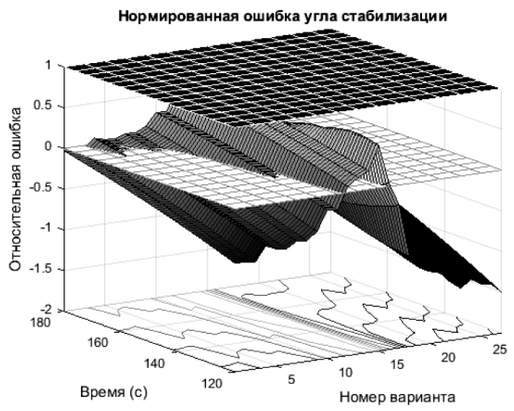
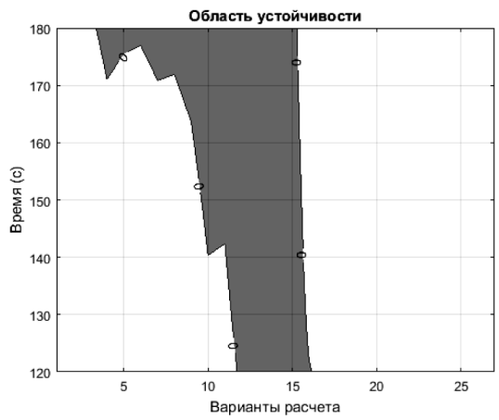
Заданные значения угла атаки (град)								
U	10	15	20	25	30	35	40	45
Коэффициенты нечеткого логического регулятора								
Ke	8.963	6.4489	4.6934	3.5751	2.9791	2.5	2.166	1.9088
Kde	399.19	328.7467	270.6118	193.2436	182.4943	158.5	149.7733	125.1357
№	Матрица диапазонов исследуемых на устойчивость значений углов атаки ***D*** (град)							
	D_{10}	D_{15}	D_{20}	D_{25}	D_{30}	D_{35}	D_{40}	D_{45}
1	7.4	12.4	17.4	22.4	27.4	32.4	37.4	42.4
2	7.6	12.6	17.6	22.6	27.6	32.6	37.6	42.6
3	7.8	12.8	17.8	22.8	27.8	32.8	37.8	42.8
4	8	13	18	23	28	33	38	43
5	8.2	13.2	18.2	23.2	28.2	33.2	38.2	43.2
6	8.4	13.4	18.4	23.4	28.4	33.4	38.4	43.4
7	8.6	13.6	18.6	23.6	28.6	33.6	38.6	43.6
8	8.8	13.8	18.8	23.8	28.8	33.8	38.8	43.8
9	9	14	19	24	29	34	39	44
10	9.2	14.2	19.2	24.2	29.2	34.2	39.2	44.2
11	9.4	14.4	19.4	24.4	29.4	34.4	39.4	44.4
12	9.6	14.6	19.6	24.6	29.6	34.6	39.6	44.6
13	9.8	14.8	19.8	24.8	29.8	34.8	39.8	44.8
14	10	15	20	25	30	35	40	45
15	10.2	15.2	20.2	25.2	30.2	35.2	40.2	45.2
16	10.4	15.4	20.4	25.4	30.4	35.4	40.4	45.4
17	10.6	15.6	20.6	25.6	30.6	35.6	40.6	45.6
18	10.8	15.8	20.8	25.8	30.8	35.8	40.8	45.8
19	11	16	21	26	31	36	41	46
20	11.2	16.2	21.2	26.2	31.2	36.2	41.2	46.2
21	11.4	16.4	21.4	26.4	31.4	36.4	41.4	46.4
22	11.6	16.6	21.6	26.6	31.6	36.6	41.6	46.6
23	11.8	16.8	21.8	26.8	31.8	36.8	41.8	46.8
24	12	17	22	27	32	37	42	47
25	12.2	17.2	22.2	27.2	32.2	37.2	42.2	47.2
26	12.4	17.4	22.4	27.4	32.4	37.4	42.4	47.4
27	12.6	17.6	22.6	27.6	32.6	37.6	42.6	47.6

1 2022.indd 133 24.03.2022 15:10:55

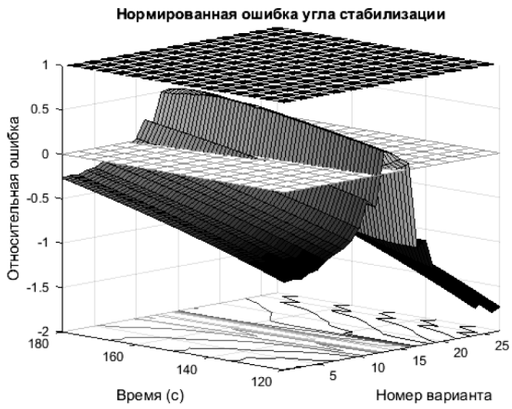
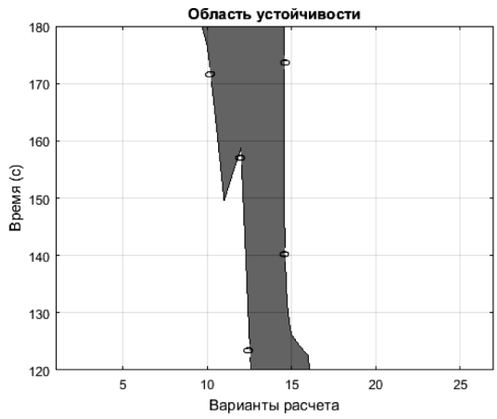
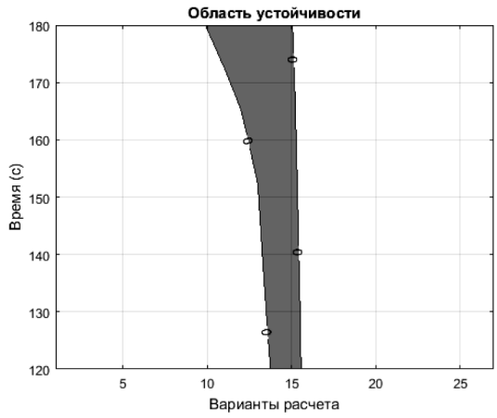
Таблица 2

Вариант	Результаты моделирования	
D_{10}	начальный угол : шаг : конечный угол	7.4 : 0.2 : 12.6
		
Устойчивые варианты	1-26	
D_{15}	начальный угол : шаг : конечный угол	12.4 : 0.2 : 17.6
		
Устойчивые варианты	1-20	
D_{20}	начальный угол : шаг : конечный угол	17.4 : 0.2 : 22.6
		
Устойчивые варианты	5-18	

1 2022.indd 134 24.03.2022 15:10:56

		
Устойчивые варианты		6-17
D_{30}	начальный угол : шаг : конечный угол	27.4 : 0.2 : 32.6
		
устойчивые варианты		11-14
D_{35}	начальный угол : шаг : конечный угол	32.4 : 0.2 : 37.6
		
устойчивые варианты		12-15
D_{40}	начальный угол : шаг : конечный угол	37.4 : 0.2 : 42.6

1 2022.indd 135 24.03.2022 15:10:57

		
Устойчивые варианты		13, 14
D_{45}	начальный угол : шаг : конечный угол	42.4 : 0.2 : 47.6
		
Устойчивые варианты		14, 15

Результаты численного моделирования

Подготовка исходных данных и расчеты проведены по представленной выше методике.

В табл. 2 представлены результаты моделирования, соответствующие исследованиям поведения системы управления для заданных восьми вариантов угла атаки.

В каждом варианте представлены четыре строки таблицы:

· первая строка таблицы – диапазон изменения угла атаки в виде

(начальный угол : шаг : конечный угол)

· вторая строка таблицы:

– 3D-график изменения нормированной ошибки угла атаки. По оси X – время изменения угла атаки на заданном интервале переходного процесса $\left(t \geq t_p = 120\,c\right)$; по оси Y – варианты для каждого из 27 заданных диапазонов угла атаки; по оси Z – нормированное значение изменения угла атаки за время его стабилизации. Кроме того, обозначены нормированные границы области допустимых отклонений угла атаки;

– график области устойчивости, в котором выделены варианты, обеспечивающие выполнение условия достижимости области допустимых отклонений угла атаки.

· третья строка таблицы – номера вариантов, обеспечивающих выполнение условия достижимости области допустимых отклонений угла атаки.

Сопоставляя номера вариантов (каждая третья строка табл. 2) со значениями углов из D_i, в табл. 1 серым цветом выделены значения, на которые допустимо изменить угол атаки для обеспечения попадания в область допустимых отклонений.

Заключение

В статье предложен подход к формированию таблицы коэффициентов усиления НЛР, обеспечи-

1 2022.indd 136 24.03.2022 15:10:57

вающих устойчивое изменение угла атаки СМ КА на заданную величину.

Разработана и апробирована методика определения и исследования области устойчивости системы управления, в контур которой введен нечеткий логический регулятор (НЛР), отвечающий за изменение угла атаки.

Сформированная таблица коэффициентов усиления НЛР может быть заранее загружена в память системы управления СМ КА и использована в полете без проведения дополнительных расчетов.

Литература

1. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. – 798 с.

2. Усков, А. А. Достаточное условие устойчивости систем управления с одномерными блоками нечеткого вывода / А.А. Усков // Проблемы управления. – 2014. – № 4. – С. 14–19.

3. Черный, С. П. Методы оценки устойчивости нечетких систем управления / С.П. Черный, Д.А. Манчук, С.И. Сухоруков // Вестник ТОГУ. – 2014. – № 3 (34). – С. 49–54.

4. Круглов, В. В. Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода / В.В. Круглов, М.И. Дли. – М.: Физматлит, 2002. – 256 с.

5. Краснощеков, С. Н. Методика формирования параметров нечеткого логического регулятора для системы управления сверхмалого космического аппарата по углу атаки за счет смещения центра масс / С.Н. Краснощеков, В.И. Половников, В.И. Пинегин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – № 8. – С. 165–173.

6. Страховский, Р. И. Метод изохрон в решении задач оптимального управления / Р.И. Страховский. – М.: Энергия, 1967. – 112 с.

7. Скворцов, Д. В. Программный комплекс имитационного моделирования орбитальных группировок космических аппаратов нанокласса / Д.В. Скворцов, С.Н. Краснощеков, Д.В. Вилисов // Сборник алгоритмов и программ прикладных задач. – 2017. – Вып. 34. – С. 13–21.

1 2022.indd 137 24.03.2022 15:10:57