

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ С НАСТРОЙКОЙ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Н.А. Первушина, А.Н. Хакимова

Аннотация. Представлен результат разработки математических моделей двух нечетких регуляторов различных по структуре и принципу действия с настройкой генетическим алгоритмом для стабилизации динамического объекта на примере статически неустойчивого летательного аппарата в канале тангажа. Один из них разработан на основе обучающей выборки, другой — на основе правил нечеткой арифметики. Приведены результаты разработки алгоритмов синтеза предложенных математических моделей регуляторов. Представлены структура и принцип действия генетического алгоритма для настройки параметров нечетких регуляторов обоих типов. Выполнено тестирование разработанного генетического алгоритма при различных режимах, и определены лучшие сочетания настроек параметров регуляторов. Получены результаты математического моделирования работы системы стабилизации с предложенными типами регуляторов после их настройки при наличии случайных возмущений на объект управления. Результаты работы системы стабилизации с разработанными регуляторами показали высокое быстродействие в сравнении с классическим способом управления. Предложенный в статье подход к построению нечетких регуляторов рекомендован при решении задачи стабилизации нелинейного неустойчивого динамического объекта с переключением режимов управления.

Ключевые слова: динамический объект, нечеткий регулятор, генетический алгоритм, система стабилизации, канал тангажа, статически неустойчивый летательный аппарат.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задачи стабилизации динамических объектов в современных системах управления (СУ) все чаще применяются различные интеллектуальные методы. Повышенным интересом пользуются нечеткие регуляторы (НР), в основном благодаря способности работать в условиях наличия НЕ-факторов (нечеткости, неполноты, неточности и др.). Нечеткие регуляторы сохраняют работоспособность при наличии помех и погрешностей измерения, а также быстро подстраиваются под меняющиеся условия эксплуатации при настройке и обучении [1–9]. Среди достоинств систем управления с НР выделяют [1]: малую чувствительность к изменению параметров объекта управления (ОУ),

а также высокое быстродействие и точное позиционирование ОУ.

В данной работе в качестве динамического объекта рассматривается беспилотный управляемый летательный аппарат (ЛА) статически неустойчивый в продольном направлении, СУ которого имеет три канала: канал крена, канал тангажа и канал рыскания [10–13]. Далее проведены исследования СУ в канале тангажа, быстродействие которого требуется обеспечить при сохранении требований по качеству и устойчивости. Классическим способом высокое быстродействие этой СУ обеспечить не удастся. Уменьшение желаемого времени переходного процесса приводит к росту перерегулирования и потере качества работы. Обеспечить требование по быстродействию необходимо, так как во время работы СУ происходит ступенчатое пере-

ключение управляющих режимов вследствие подачи потребного значения нормальной перегрузки на траектории полета ЛА. В настоящее время задача синтеза системы управления ЛА с классической формой сигналов управления [10–12, 14] решается, и авторами настоящей статьи в том числе, с помощью метода «замороженных коэффициентов» и построением линеаризованной модели ОУ для каждого из режимов полета с последующей аппроксимацией полученных коэффициентов в зависимости от уровня скоростного напора. Сигнал управления в канале тангажа формируется рассогласованием по перегрузке, интегралом от рассогласования и сигналом, пропорциональным угловой скорости тангажа (демпфером). Для решения задач стабилизации ЛА могут также применяться и классические ПИД-регуляторы [15, 16].

Существуют нечеткие варианты ПИД-регуляторов [3, 9, 17]. Эффективность работы подобных регуляторов авторами статьи [17] аргументировано ставится под сомнение. А также указывается недостаток алгоритмов нечеткого регулирования — сложность в сравнении с традиционными четкими алгоритмами. Однако существует множество примеров работы НР, улучшающих качество работы СУ. В статье [9] приводится пример успешной работы алгоритма нелинейного нечеткого логического регулятора ПИД-типа, где настройка в каждом из каналов управления осуществляется с помощью желаемой управляющей кривой. Нечеткий регулятор, предложенный в работе [18] для дистанционно пилотируемого ЛА со статической продольной неустойчивостью, по результатам математического моделирования показал успешное применение, как и нечеткие логические модели в исследованиях других авторов, например, [19, 20].

В настоящей статье предпринята попытка разработки и применения в рамках компьютерного моделирования математических моделей НР в системе стабилизации беспилотного ЛА. Нечеткое управление в данном случае рассматривается как альтернативный способ управления, обладающий важным достоинством — быстродействием.

Предлагаются математические модели двух нечетких регуляторов. Структуры НР отличаются от нечетких ПИД-регуляторов тем, что управление формируется не в каждом из каналов (пропорциональном, интегральном и дифференциальном) на основе работы базы правил конкретного канала [17], а в зависимости от всех входных переменных сразу. В работе предлагаются математические модели двух различных по структуре и принципу действия регуляторов в целях анализа работоспособности положенных в их основу нечетких моделей, а также для заключения о возможности их применения в рассматриваемом контуре СУ.

Что касается сложности описания нечетких моделей, то для НР она в основном определяется числом входов u , а также числом нечетких переменных (термов) для описания каждого входа x [1]. Число правил в базе правил НР определяется как x^y . Сокращать число термов x при описании входов и выхода НР нецелесообразно, так как пострадает качество работы. Уменьшение же числа входов u вполне возможно, что при правильно подобранной структуре НР, базе правил и механизме вывода не снизит качество. Поэтому есть смысл минимизировать именно значение u , например, сократить число входных переменных с трех (как у ПИД-регулятора) до двух. В связи с чем авторами статьи предлагаются математические модели с двумя входными переменными. Первый НР построен на основе обучающей выборки [21], а второй — с применением нечеткой арифметики [1]. Настройка параметров предлагаемых НР выполняется с помощью эвристического метода моделирования — генетического алгоритма (ГА) [2, 3].

Представленные в статье результаты получены путем компьютерного моделирования. В качестве ОУ рассматривается статически неустойчивый ЛА в канале тангажа. Полет ЛА в атмосфере Земли описывается системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений с коэффициентами, зависящими от параметров набегающего потока.

В статье представлены результаты последовательного решения задач:

- разработка математических моделей систем стабилизации с нечеткими регуляторами двух предложенных типов;
- разработка структуры и принципа действия каждого из нечетких регуляторов;
- создание ГА для настройки параметров нечетких регуляторов;
- проведение тестирования работы генетического алгоритма;
- получение результатов работы системы стабилизации (СС) с нечеткими регуляторами после их настройки с помощью ГА при наличии случайных возмущений.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При разработке математических моделей систем управления с НР за основу была взята классическая структура системы стабилизации (рис. 1). Сигнал управления в канале тангажа соответственно имеет вид [12]:

$$\sigma_{\text{в}} = K_i \int_{t_0}^t \Delta n_y dt + K_n \Delta n_y - K_{\omega_z} \omega_z. \quad (1)$$

Обозначения на рис. 1 и в формуле (1): ОУ — объект управления; РП — рулевой привод; $n_{y \text{ зад}}$ —

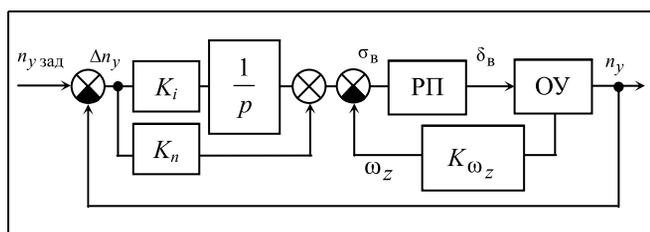


Рис. 1. Классическая структура системы стабилизации летательного аппарата в канале тангажа

заданное значение нормальной перегрузки; n_y — выходное значение СС; Δn_y — значение рассогласования $\Delta n_y = n_{y\text{ зад}} - n_y$; $\sigma_{\text{в}}$ — сигнал управления рулями высоты, град.; $\delta_{\text{в}}$ — угол отклонения рулей высоты, град.; K_i , K_n и K_{ω_z} — известные коэффициенты усиления соответствующей размерности; ω_z — угловая скорость тангажа, град./с; p — переменная преобразования Лапласа.

Объект управления описывается нелинейной математической моделью в связанной с ЛА системе координат [13]:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_z}{dt} = \frac{m_z q S L}{I_{zz}} \cdot \frac{180}{\pi}, \\ \frac{d\alpha}{dt} = \left(\frac{g \cos \vartheta}{V} - \frac{c_y q S}{m V} \right) \cdot \frac{180}{\pi} + \omega_z; \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \omega_z, \end{cases} \quad (2)$$

где ω_z — угловая скорость тангажа, град./с; α — угол атаки, град.; ϑ — угол тангажа, град.; $m_z = m_z(M, \alpha, \delta_{\text{в}}, \dots)$ — аэродинамический коэффициент момента тангажа, нелинейно зависящий от параметров набегающего потока, угла отклонения рулей высоты и др., безразмерная величина; $c_y = c_y(M, \alpha, \delta_{\text{в}}, \dots)$ — аэродинамический коэффициент подъемной силы, нелинейно зависящий от параметров набегающего потока, угла отклонения рулей высоты и др., безразмерная величина; M — число Маха; q — скоростной напор, Па; S — площадь миделя, м^2 ; L — характерный линейный размер ЛА, м; m — масса ЛА, кг; V — воздушная скорость ЛА, м/с; $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

Математическая модель РП в настоящей задаче принята линейной.

Требования к качеству работы СС:

- время отработки $t_{\text{пер}}$ заданного управляющего ступенчатого воздействия на уровне 0,95 от установившегося значения должно быть минимально возможным;
- перерегулирование σ в переходном процессе сигнала на выходе СС должно быть минимально на этапе синтеза и не превышать 30 %;
- уровень сигнала управления $\sigma_{\text{в}}$ должен быть ограничен: $\pm 20^\circ$.

В соответствии с перечисленными требованиями был выполнен синтез СС (см. рис. 1) методом логарифмических амплитудных характеристик [15]. Минимально возможное время переходного процесса в линеаризованной СС составляет $t_{\text{пер}} = 1,5 \text{ с}$ при $\sigma = 30 \%$, исходя из аэродинамических и массово-центровочных характеристик рассматриваемого ЛА. Повысить быстродействие СС со структурой, представленной на рис. 1, не удалось вследствие того, что значение σ уже принимает предельное значение, а уменьшение времени $t_{\text{пер}}$ приведет только к росту перерегулирования. Работа СС в канале тангажа с сигналом управления (1) приведена на рис. 10 (серая линия). В связи с вышеизложенным, целесообразно использовать свойства нечеткого управления для улучшения качества работы, рассматриваемой СС.

2. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ С НЕЧЕТКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Предлагаются два типа НР, входными переменными которых служат Δn_y (Δn_y^*) и ω_z , а выходной переменной — сигнал управления НР $\sigma_{\text{НР}}$. На рис. 2 представлены функциональные схемы СС в канале тангажа с двумя нечеткими регуляторами, которые отличаются по структуре и принципу действия. Схема СС с НР на основе обучающей выборки приведена на рис. 2, а, схема СС с НР, построенным с применением нечеткой арифметики показана на рис. 2, б.

Статическая ошибка в предлагаемых схемах СС компенсируется с помощью интеграла рассогласования $\int \Delta n_y dt$. Далее рассмотрим структуру каждого из предложенных нечетких регуляторов.

2.1. Структура и принцип работы НР₁

На основе математической модели СС (см. рис. 1) с сигналом управления (1), коэффициенты которого известны, получена обучающая выборка при моделировании работы СС с различной амплитудой ступенчатого входного воздействия $n_{y\text{ зад}} \cdot 1(t)$, где $1(t)$ — единичная ступенчатая функ-

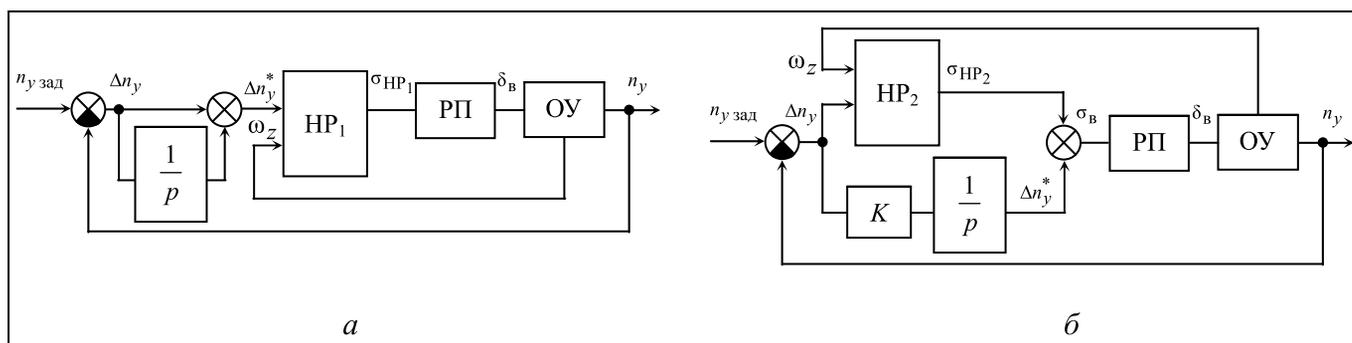


Рис. 2. Функциональные схемы СС с предлагаемыми НР: а — на основе обучающей выборки (HP_1); б — на основе нечеткой арифметики (HP_2), K — коэффициент усиления

ция [15, 16]. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

Построение HP_1 предлагается выполнять в рамках структуры рис. 2, а. Первый вход НР обозначен Δn_y^* , сигнал которого складывается из рассогласования Δn_y и интеграла рассогласования $\int \Delta n_y dt$. Второй вход формируется уровнем угловой скоро-

сти тангажа ω_z . Выходом HP_1 служит сигнал управления σ_{HP1} , который одновременно является сигналом управления в канале тангажа σ_B .

Параметры HP_1 имеют терм-множества, представленные на рис. 3. Число термов n взято достаточно большим для повышения точности [1] формирования выходного сигнала σ_{HP1} . При двух

Обучающая выборка для синтеза HP_1

Таблица 1

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $n_{y \text{ зад}}$ | -1 | -0,8 | -0,6 | -0,4 | -0,2 | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,5 |
| Δn_y^{\max} | -1 | -0,8 | -0,6 | -0,4 | -0,2 | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,5 |
| ω_z^{\max} , град./с | -24 | -22 | -18 | -13 | -9 | -4,5 | 2,5 | 7 | 12 | 16 | 18 | 24 |
| σ_B^{\max} , град. | 20 | 20 | 15 | 10 | 5 | 1 | -5 | -10 | -15 | -20 | -20 | -20 |

База правил HP_1

Таблица 2

| ω_z | Δn_y^* | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | ОБ | О ₄ | О ₃ | О ₂ | О ₁ | Н | П ₁ | П ₂ | П ₃ | П ₄ | ПБ |
| ОБ | ПБ ¹ | ПБ ² | ПБ ³ | П ₄ ⁴ | П ₄ ⁵ | П ₃ ⁶ | П ₃ ⁷ | П ₂ ⁸ | П ₂ ⁹ | П ₁ ¹⁰ | Н ¹¹ |
| О ₄ | ПБ ¹² | ПБ ¹³ | П ₄ ¹⁰ | П ₄ ¹⁵ | П ₃ ¹⁶ | П ₃ ¹⁷ | П ₂ ¹⁸ | П ₂ ¹⁹ | П ₁ ²⁰ | Н ²¹ | О ₁ ²² |
| О ₃ | ПБ ²³ | П ₄ ²⁴ | П ₄ ²⁵ | П ₃ ²⁶ | П ₃ ²⁷ | П ₂ ²⁸ | П ₂ ²⁹ | П ₁ ³⁰ | Н ³¹ | О ₁ ³² | О ₂ ³³ |
| О ₂ | П ₄ ³⁴ | П ₄ ³⁵ | П ₃ ³⁶ | П ₃ ³⁷ | П ₂ ³⁸ | П ₂ ³⁹ | П ₁ ⁴⁰ | Н ⁴¹ | О ₁ ⁴² | О ₂ ⁴³ | О ₂ ⁴⁴ |
| О ₁ | П ₄ ⁴⁵ | П ₃ ⁴⁶ | П ₃ ⁴⁷ | П ₂ ⁴⁸ | П ₂ ⁴⁹ | П ₁ ⁵⁰ | Н ⁵¹ | О ₁ ⁵² | О ₂ ⁵³ | О ₂ ⁵⁴ | О ₃ ⁵⁵ |
| Н | П ₃ ⁵⁶ | П ₃ ⁵⁷ | П ₂ ⁵⁸ | П ₂ ⁵⁹ | П ₁ ⁶⁰ | Н ⁶¹ | О ₁ ⁶² | О ₂ ⁶³ | О ₂ ⁶⁴ | О ₃ ⁶⁵ | О ₃ ⁶⁶ |
| П ₁ | П ₃ ⁶⁷ | П ₂ ⁶⁸ | П ₂ ⁶⁹ | П ₁ ⁷⁰ | Н ⁷¹ | О ₁ ⁷² | О ₂ ⁷³ | О ₂ ⁷⁴ | О ₃ ⁷⁵ | О ₃ ⁷⁶ | О ₄ ⁷⁷ |
| П ₂ | П ₂ ⁷⁸ | П ₂ ⁷⁹ | П ₁ ⁸⁰ | Н ⁸¹ | О ₁ ⁸² | О ₂ ⁸³ | О ₂ ⁸⁴ | О ₃ ⁸⁵ | О ₃ ⁸⁶ | О ₄ ⁸⁷ | О ₄ ⁸⁸ |
| П ₃ | П ₂ ⁸⁹ | П ₁ ⁹⁰ | Н ⁹¹ | О ₁ ⁹² | О ₂ ⁹³ | О ₂ ⁹⁴ | О ₃ ⁹⁵ | О ₃ ⁹⁶ | О ₄ ⁹⁷ | О ₄ ⁹⁸ | ОБ ⁹⁹ |
| П ₄ | П ₁ ¹⁰⁰ | Н ¹⁰¹ | О ₁ ¹⁰² | О ₂ ¹⁰³ | О ₂ ¹⁰⁴ | О ₃ ¹⁰⁵ | О ₃ ¹⁰⁶ | О ₄ ¹⁰⁷ | О ₄ ¹⁰⁸ | ОБ ¹⁰⁹ | ОБ ¹¹⁰ |
| ПБ | Н ¹¹¹ | О ₁ ¹¹² | О ₂ ¹¹³ | О ₂ ¹¹⁴ | О ₃ ¹¹⁵ | О ₃ ¹¹⁶ | О ₄ ¹¹⁷ | О ₄ ¹¹⁸ | ОБ ¹¹⁹ | ОБ ¹²⁰ | ОБ ¹²¹ |

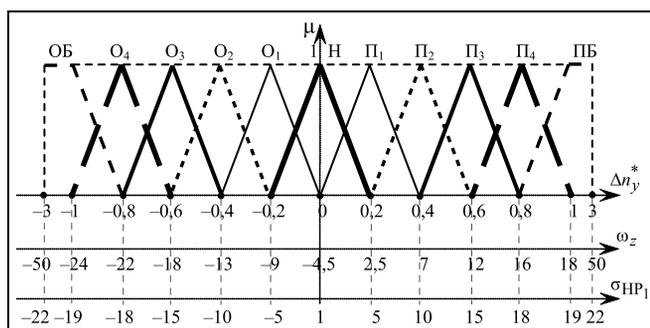


Рис. 3. Терм-множества для HP_1

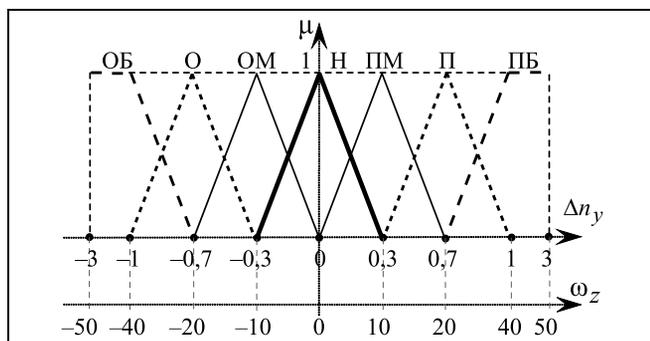


Рис. 4. Терм-множества для HP_2

входных параметрах ($y = 2$) и одиннадцати термах ($x = 11$) общее число правил равно $11^2 = 121$.

Обозначения термов на рис. 3: О — «отрицательный», П — «положительный», ОБ — «отрицательный большой», ПБ — «положительный большой», Н — «нулевой». При описании параметров HP_1 выбраны многоугольные функции принадлежности [1] в силу того, что именно они чаще всего применяются на практике и их существенное преимущество состоит в том, что для их определения требуется наименьший по сравнению с остальными функциями объем информации, который ограничивается данными об угловых точках, что важно при моделировании систем с НЕ-факторами.

Схематично база правил HP_1 приведена в табл. 2, где верхний индекс каждого элемента таблицы указывает номер правила в базе. Пример логического правила:

«Если Δn_y^* является ОБ и ω_z является ОБ, то σ_{HP_1} является ПБ».

В механизме вывода HP_1 для операции агрегирования (логическая связка И) применяется оператор минимума (MIN). Для построения промежуточного вывода по каждому из активированных правил применяется оператор умножения (PROD), а при построении результирующего вывода (объ-

единения промежуточных выводов) — оператор максимума (MAX) [1]. Это схема Ларсена. Отличие такой схемы вывода от наиболее часто применяемого механизма вывода Мамдани в том, что применяется оператор PROD вместо оператора MIN. Это позволяет учесть влияние на результат двух параметров, а не только одного, соответствующего минимуму.

2.2. Структура и принцип работы HP_2

Для удобства синтеза HP_2 преобразуем классическое управляющее воздействие (1) таким образом:

$$\begin{aligned} \sigma_B &= K \int_{t_0}^t (n_{y \text{ зад}} - n_y) dt + [Kc_1(n_{y \text{ зад}} - n_y) + c_2(-\omega_z)] = \\ &= K \int_{t_0}^t (n_{y \text{ зад}} - n_y) dt + \sigma_{HP_2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где K — настраиваемый коэффициент усиления, соизмеримый с коэффициентом K_i из выражения (1); c_1 — настраиваемый коэффициент пропорциональности из интервала (0, 1], определяющий соотношение коэффициентов сигнала управления K_n к коэффициенту K_i из выражения (1); c_2 — постоянный коэффициент, определяемый максимальным уровнем возмущения в начальный момент времени в виде угловой скорости тангажа ω_z ($c_2 = K_{\omega_z}$).

В структуре HP_2 также, как в структуре HP_1 , два входа и один выход. На первый вход подается рассогласование Δn_y . Вторым входом формируется значением угловой скорости тангажа ω_z . Выходом HP_2 служит сигнал управления σ_{HP_2} , который входит в состав управляющего воздействия (3).

Два входных параметра Δn_y и ω_z описаны термножествами, представленными на рис. 4. Число

Таблица 3

База правил HP_2

| ω_z | Δn_y | | | | | | |
|------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|
| | ОБ | О | ОМ | Н | ПМ | П | ПБ |
| ОБ | $S_{ОБ}^1$ | S_3^2 | S_3^3 | S_3^4 | S_3^5 | S_3^6 | S_4^7 |
| О | S_3^8 | S_1^9 | S_1^{10} | S_1^{11} | S_1^{12} | S_1^{13} | S_2^{14} |
| ОМ | S_3^{15} | S_1^{16} | S_1^{17} | S_1^{18} | S_1^{19} | S_1^{20} | S_2^{21} |
| Н | S_3^{22} | S_1^{23} | S_1^{24} | S_1^{25} | S_1^{26} | S_1^{27} | S_2^{28} |
| ПМ | S_3^{29} | S_1^{30} | S_1^{31} | S_1^{32} | S_1^{33} | S_1^{34} | S_2^{35} |
| П | S_3^{36} | S_1^{37} | S_1^{38} | S_1^{39} | S_1^{40} | S_1^{41} | S_2^{42} |
| ПБ | S_4^{43} | S_2^{44} | S_2^{45} | S_2^{46} | S_2^{47} | S_2^{48} | $S_{ПБ}^{49}$ |

термов при описании параметров для $НР_2$ взято меньше, чем для $НР_1$, поскольку выходной сигнал в $НР_2$ не назначается, а формируется для каждой комбинации входных параметров по правилам сложения нечетких чисел в LR-форме [1]. При двух входных параметрах ($y = 2$) и семи термах ($x = 7$) общее число правил в базе правил $НР_2$ составило 49. Схематично база правил $НР_2$ приведена в табл. 3, где S — обозначение результата сложения соответствующих нечетких чисел, а номер правила в базе указывает верхний индекс каждого элемента

таблицы. Схема механизма вывода такая же, как в $НР_1$ — алгоритм Ларсена. На рис. 4 обозначения соответствуют рис. 3, ОМ — «отрицательный маленький», ПМ — «положительный маленький».

3. СТРУКТУРА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Для настройки параметров обоих НР был разработан ГА, порядок работы которого схематично приведен в табл. 4. Структура ГА принята типовой

Таблица 4

Порядок работы генетического алгоритма

| Этапы | НР | |
|---|--|--------|
| | $НР_1$ | $НР_2$ |
| Начальные данные | Тип нечеткого регулятора NR : $NR = 1$ $NR = 2$ Режим работы алгоритма: вероятностный или детерминированный Группы генов и диапазоны с указанием верхних (2) и нижних (1) границ: a_1 — массив границ терма Δn_y^* из $[\Delta n_y^1, \Delta n_y^2]$ b_1 — коэффициент из $[K^1, K^2]$ a_2 — массив границ терма ω_z из $[\omega_z^1, \omega_z^2]$ b_2 — коэффициент из $[c_1^1, c_1^2]$ a_3 — массив границ терма $\sigma_{НР1}$ из $[\sigma^1, \sigma^2]$ b_3 — коэффициент из $[c_2^1, c_2^2]$ b_4 — массив границ терма Δn_y из $[n_y^1, n_y^2]$ b_5 — массив границ терма ω_z из $[\omega_z^1, \omega_z^2]$ Число групп генов n в хромосоме: $n = 3$ $n = 5$ Число хромосом для кроссинговера m — натуральное число ≥ 2 Число шагов до оптимального решения: k Стартовое значение функции ¹ пригодности по формуле (4): IKO_0 | |
| Работа генетического алгоритма | Формирование начальной популяции (результат мутации) $m = 2$: $H_1 = \{a_1, a_2, a_3\}$ $H_2 = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ $H'_1 = \{a'_1, a'_2, a'_3\}$ $H'_2 = \{b'_1, b'_2, b'_3, b'_4, b'_5\}$ Выполнение кроссинговера (перемешивание групп генов): число хромосом в популяции $S = m^n$ $S = 2^3 = 8$: $S = 2^5 = 32$: $\{a_1, a_2, a_3\}$ $\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ $\{a_1, a_2, , a'_3\}$ $\{b_1, b_2, b_3, b_4, b'_5\}$ $\{a_1, a'_2, a_3\}$ $\{b_1, b_2, b_3, b'_4, b_5\}$ $\{a'_1, a'_2, a'_3\}$ $\{b'_1, b'_2, b'_3, b'_4, b'_5\}$ Оценка степени пригодности хромосом текущей популяции: по значениям ФП для каждой из хромосом популяции определяется процент выживаемости и выбирается лучшая хромосома ² Проверка условия остановки ³ алгоритма Получение оптимальных ⁴ параметров НР $H_{1\text{ опт}} = \{a_1, a_2, a_3\}$ $H_{2\text{ опт}} = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ | |
| Примечания. ¹ В вероятностном режиме значение IKO_0 соответствует первой сгенерированной хромосоме, которая обеспечивает перерегулирование в СС менее 30 %. ² В случае отсутствия лучшей хромосомы заново выполняется этап формирования начальной популяции. ³ Число отобранных хромосом должно быть равно k , если условие не выполняется, то продолжает формироваться начальная популяция. ⁴ Оптимальные параметры НР соответствуют лучшей из k отобранных хромосом. | | |

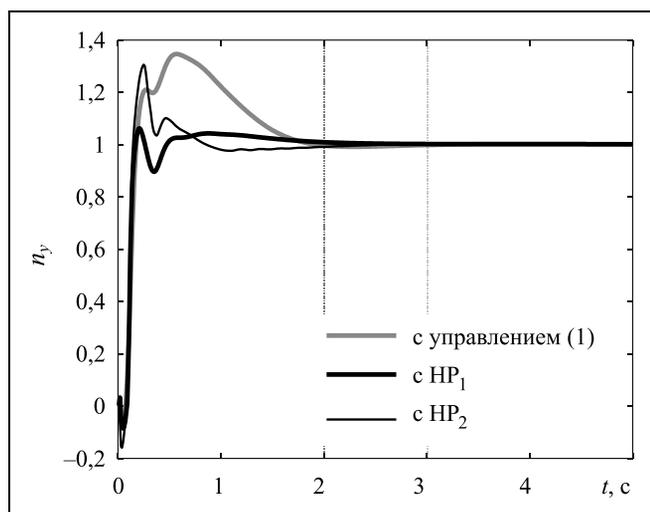


Рис. 5. Предварительные результаты работы СС с разными типами регуляторов

[3], ГА подобной структуры разрабатывался авторами ранее и был успешно практически применен в рамках модельной задачи стабилизации неустойчивого ОУ [21].

Детерминированный режим работы ГА предполагает, что начальная популяция содержит одну стартовую хромосому, а следующие хромосомы строятся из имеющейся с помощью мутации генов — замены нескольких значений генов случайными числами из соответствующих диапазонов. Вероятностный режим работы ГА применяется в том случае, если стартовая хромосома отсутствует. Тогда начальная популяция генерируется случайным образом в рамках заданных диапазонов.

Функция пригодности (ФП) ГА может быть выражена в виде интегральной оценки качества работы СС. В данном ГА предлагается воспользоваться интегральным критерием качества ИКО (интеграл квадрата ошибки) [15, 21]:

$$ИКО = \int_{t_0}^t \Delta n_y^2 t dt. \quad (4)$$

Работа ГА осуществляется в рамках СС канала тангажа ЛА (рис. 2) в зависимости от типа настраиваемого НР (НР₁ или НР₂).

Компьютерное моделирование работы ГА выполнялось для нелинейной математической модели динамики полета неустойчивого беспилотного ЛА в канале тангажа в соответствии со структурными схемами (см. рис. 2). Перед запуском ГА задается число шагов k последовательного приближения к оптимальному решению, которое должно выбираться разумно, исходя из возможностей вычислительной техники и времени решения пос-

тавленной задачи. Под оптимальным решением понимается результат последовательного подбора генетическим алгоритмом параметров НР по минимуму критерия (4) за k шагов.

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ С НЕЧЕТКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

На начальном этапе разработки коэффициенты НР₁ и НР₂ были подобраны вручную, опираясь на обучающую выборку (см. табл. 1). Математические модели нечетких регуляторов реализованы на языке программирования Си. Моделирование работы СС выполнялось в стандартной среде программирования и инженерных расчетов. Результат моделирования работы СС с разными типами регуляторов при $t = 5$ с представлен на рис. 5.

Время переходного процесса во всех случаях не превышает 1,5 с. Однако системы стабилизации с управлением (1) и с НР₂ после ручной настройки его параметров работают с предельно допустимым перегулированием около 30 %. Система стабилизации с НР₁ работает удовлетворительно с перегулированием 6 %.

Качество переходного процесса в СС с НР₁ и НР₂ может быть улучшено с помощью настройки коэффициентов НР посредством разработанного ГА (см. далее § 5).

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ГА ПРИ НАСТРОЙКЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Для подтверждения работоспособности ГА при настройке коэффициентов НР было выполнено тестирование двух типов регуляторов (НР₁ и НР₂) в двух режимах работы (детерминированный и вероятностный). В результате было сформировано 4 тестовых режима.

Для каждого из режимов работы ГА условия проведения тестирования были выбраны одинаковыми: $m = 2$, $k = 10$, $t = 3$ с. Число запусков ГА N принято равным 30, чтобы обеспечить объем малой выборки для статистического анализа результатов [22].

На рис. 6, а для примера приведен результат подбора параметров НР₁ в одном из запусков ГА в детерминированном режиме. Тонкой линией показаны результаты работы на 9-ти промежуточных итерациях при отборе лучшей хромосомы. Лучший результат $H_{1 \text{ опт}}$ получен на 10-м шаге подбора и выделен жирной линией. На рис. 6, б приведен результат подбора параметров НР₂ в одном из запусков ГА в вероятностном режиме. Тонкой линией также показан результат работы СС с НР₂ на 9-ти

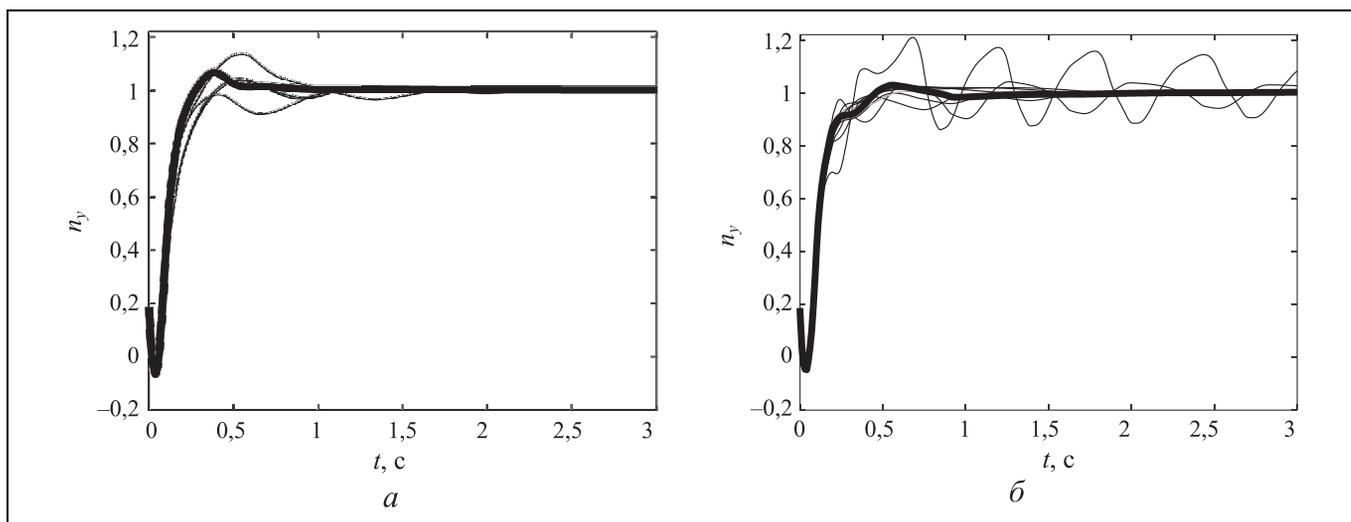


Рис. 6. Подбор параметров нечетких регуляторов: *a* — для $НР_1$ в детерминированном режиме; *b* — для $НР_2$ в вероятностном режиме

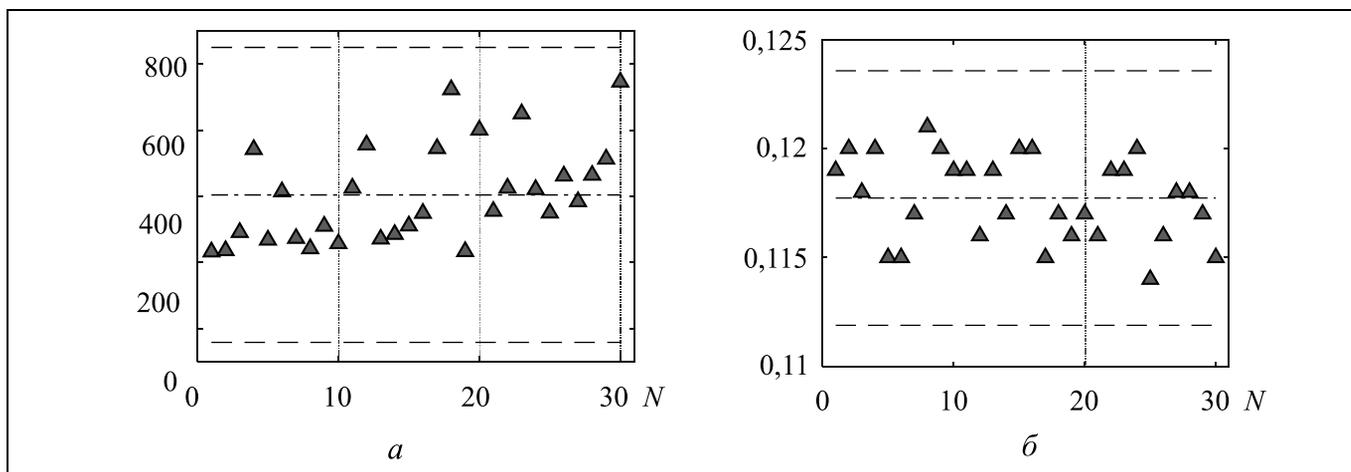


Рис. 7. Данные при настройке параметров $НР_1$ в детерминированном режиме: *a* — число итераций ГА; *b* — значения ФП

промежуточных итерациях одного из запусков ГА, а также жирно выделен конечный результат, соответствующий H_{2opt} .

На рис. 7 изображены статистические данные по числу итераций и значению ФП (ИКО) в зависимости от запуска ГА при настройке параметров $НР_1$ в детерминированном режиме. Отмечены средние значения и интервалы в ЗСКО. Видно, что данные расположены в хаотичном порядке, группируются относительно среднего значения и не выходят за границы интервала ЗСКО, что служит качественным подтверждением того, что анализируемые параметры имеют нормальное распределение, т. е. не зависят от номера запуска и не коррелированы между собой.

На рис. 8 изображены аналогичные статистические данные, полученные при настройке параметров $НР_2$ в вероятностном режиме.

Данные расположены в хаотичном порядке, группируются относительно среднего значения, но имеют резко выделяющиеся значения (РВЗ) в разных запусках. Нормальность распределения подтвердить имеющейся малой выборкой нельзя. Отметим, что число итераций в вероятностном режиме при поиске оптимального решения по результатам тестирования имеет большой разброс: от 10 до 500 значений. Иногда случается, что начальная хромосома генерируется не самым удачным образом и последующие 10 шагов ее оптимизации не приводят к надлежащему результату, хотя в сво-

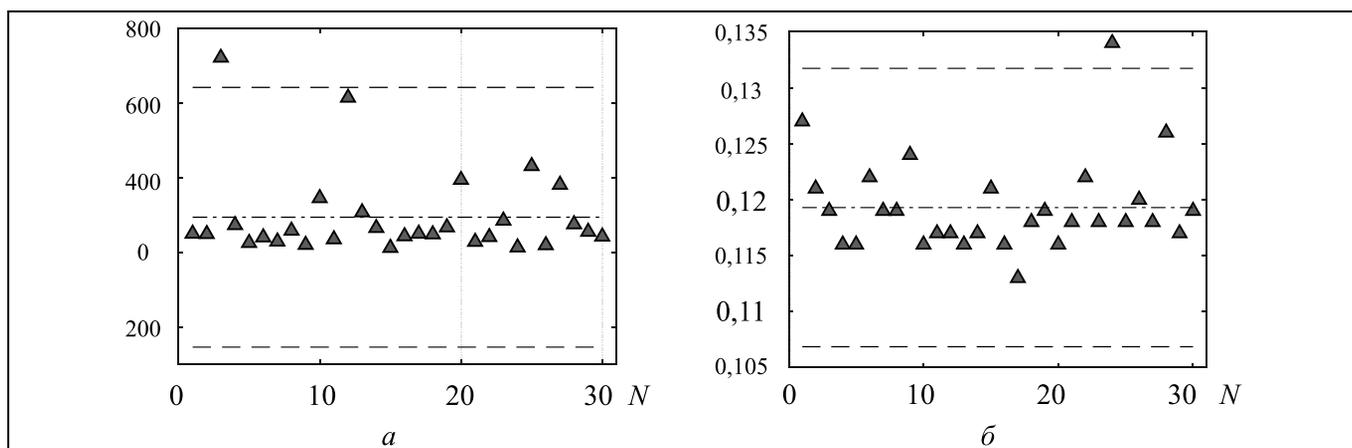


Рис. 8. Данные при настройке параметров НР₂ в вероятностном режиме: *a* — число итераций ГА; *б* — значения ФП

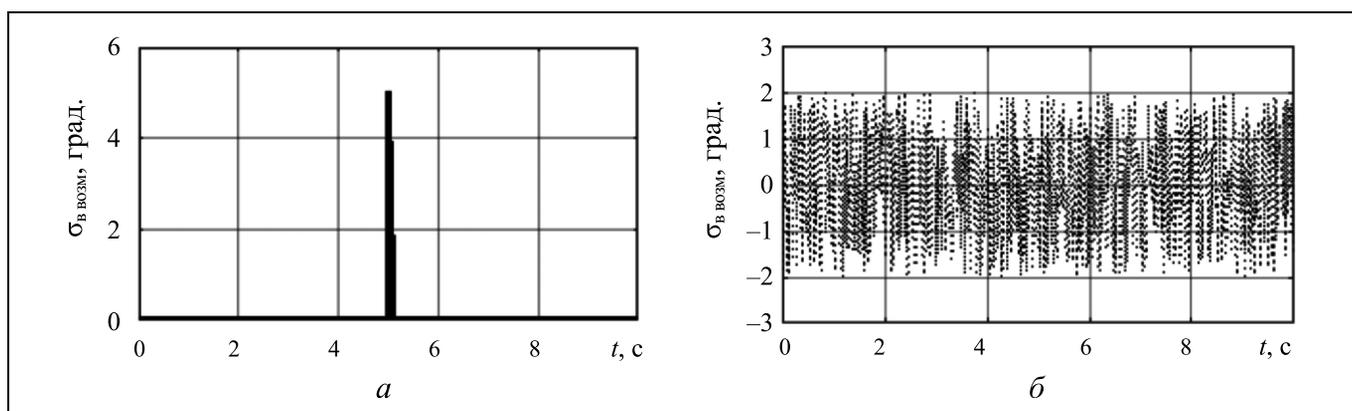


Рис. 9. Виды возмущений: *a* — одиночный импульс; *б* — помеха типа «белый шум»

ем запуске этот результат является лучшим. Перечисленные особенности работы ГА могут являться причинами появления РВЗ.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Тестирование работы СС неустойчивого ОУ с предложенными типами НР после настройки ГА было выполнено в целях оценки работоспособности СС в условиях наличия случайных возмущений на ОУ в виде дополнительного управляющего воздействия $\sigma_{в.возм}$.

Для подтверждения работоспособности СС с НР были выбраны 3 тестовых режима при наличии:

- случайного возмущения в виде одиночного импульса (рис. 9, *a*);
- возмущения в момент включения СС;
- помехи типа «белый шум» (рис. 9, *б*).

Системы стабилизации с НР обладают высоким быстродействием, что подтвердилось в проведенных тестах при $t = 10$ с (рис. 10). Для сравнения, время переходного процесса $t_{пер}$ и перерегулирование σ в СС при отсутствии возмущений (см. рис. 10, *a* при $t = 0...5$ с) приведено в табл. 5.

Из результатов компьютерного моделирования следует вывод о том, что применение НР после их

Таблица 5

Значения показателей качества переходного процесса

| СС | Показатель | |
|-------------------|--|--------------------------------|
| | Время переходного процесса $t_{пер}$, с | Перерегулирование σ , % |
| с НР ₁ | 0,45 | 7 |
| с НР ₂ | 0,50 | 0 |
| с управлением (1) | 1,50 | 35 |

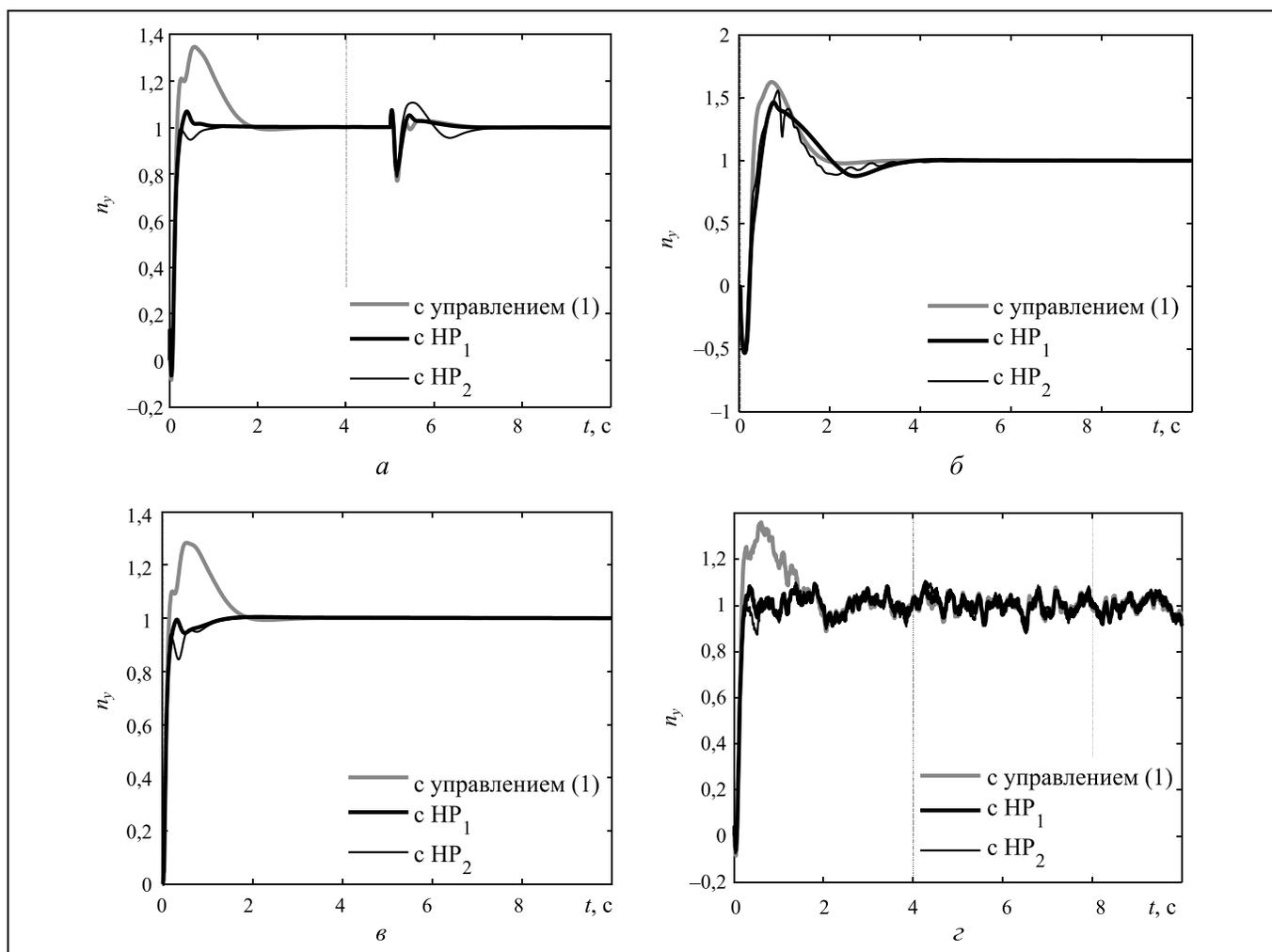


Рис. 10. Результаты моделирования работы СС с НР₁ и НР₂ с оптимальными параметрами (пояснения в тексте)

настройки с помощью ГА в рассматриваемой СС позволило увеличить быстродействие системы в 3 раза и уменьшить перерегулирование в 5 раз и более.

Исключение составил результат тестирования, представленный на рис. 10, б. Здесь качество работы СС соизмеримо с классической схемой стабилизации. Детерминированный режим работы ГА позволил подобрать лучшие сочетания параметров

как для НР₁, так и для НР₂; НР₁ обеспечивает лучшее качество работы СС по критерию ИКО при наличии случайных возмущений практически во всех тестовых режимах (табл. 6). Система стабилизации с нечеткими регуляторами не обладает фильтрующими свойствами при случайном входном воздействии типа «белый шум» и реагирует на данное воздействие также, как при классическом способе стабилизации.

Таблица 6

Значения критерия ИКО для СС в каждом из тестовых режимов за 10 с

| СС | Режим | | | |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| | Одиночный импульс | Возмущение в момент включения | | Помеха типа «белый шум» |
| | | $\omega_{z t_0} = -30$, градус/с | $\omega_{z t_0} = 15$, град./с | |
| с НР ₁ | 0,120 | 0,612 | 0,063 | 0,127 |
| с НР ₂ | 0,124 | 0,586 | 0,067 | 0,133 |
| с управлением (1) | 0,200 | 0,702 | 0,116 | 0,203 |



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен результат разработки математических моделей различных по структуре и принципу действия нечетких регуляторов в системе стабилизации динамического объекта на примере статически неустойчивого летательного аппарата (ЛА) в канале тангажа. Настройка коэффициентов регуляторов выполнена с помощью разработанного генетического алгоритма (ГА). Тестирование работы ГА проведено в объеме малой выборки с целью получения статистических оценок для базовых параметров. По результатам тестирования выбраны лучшие сочетания настроек параметров для каждого нечеткого регулятора (НР). Подтверждена работоспособность ГА.

Работоспособность математических моделей НР подтверждена в ходе тестирования работы системы стабилизации (СС) при ступенчатом входном воздействии и наличии случайных возмущений. Результаты тестов показали, что детерминированный режим работы ГА позволил подобрать лучшее сочетание параметров нечетких регуляторов в сравнении с вероятностным режимом, и в большинстве тестов СС с НР показала лучшее качество работы по интегральному критерию качества. Рассмотренная система стабилизации с НР имеет высокое быстродействие, однако не обладает фильтрующими свойствами по отношению к случайным возмущениям.

Реализация математических моделей НР автоматами выполнена в виде программного кода, что позволяет осуществлять компьютерное моделирование работы СС. Предложенные математические модели НР с настройкой параметров ГА по результатам моделирования позволяют повысить быстродействие СС в 3 раза без ухудшения качества работы по интегральному критерию. Техническая реализация данных алгоритмов при испытаниях на реальном объекте управления и в реальной СС требует дальнейшей проработки.

Предложенный подход к построению НР может быть рекомендован для решения задачи стабилизации нелинейного неустойчивого динамического объекта с переключением режимов управления, если необходимо значительно повысить быстродействие без ухудшения качества работы СС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. А.Г. Подвесовского, Ю.В. Тюменцева. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 798 с. [*Piegat, A.* Nечetkoe modelirovanie i upravlenie / Per. s angl.: A.G. Podvesovskogo, Yu.V. Tyumentseva. — М.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013. — 798 s. (In Russian)]
2. *Васильев В.И., Ильясов Б.Г.* Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. — М.: Радиотехника, 2009. — 392 с. [*Vasil'ev, V.I., Ilyasov, B.G.* Intellektual'nye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika: uchebnoe posobie. — М.: Radiotekhnika, 2009. — 392 s. (In Russian)]
3. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горная линия. Телеком, 2004. — 452 с. [*Rutkovskaya, D., Pili'nskii, M., Rutkovskii, L.* Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy: Per. s pol'sk.: I.D. Rudinskogo. — М.: Goryachaya liniya. Telekom, 2004. — 452 s. (In Russian)]
4. *Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебн. / под ред. Н.Д. Егупова.* М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 744 с. [*Metody robastnogo, neuro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya: uchebnik / pod. red. N.D. Egupova.* — М.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2002. — 744 s. (In Russian)]
5. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 736 с. [*Leonenkov, A.V.* Nечetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. — SPb.: BKHV-Peterburg, 2003. — 736 s. (In Russian)]
6. *Васильев С.Н., Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф.* и др. Интеллектуальные системы управления и нечеткие регуляторы. Ч. 1. Нечеткие модели, логико-лингвистические и аналитические регуляторы // Датчики и системы. — 2017. — № 1. — С. 4—19. [*Vasil'ev, S.N., Kudinov, Yu.I., Pashchenko, F.F., et al.* Intellektual'nye sistemy upravleniya i nechetkie regulatory. Ch. 1. Nечetkie modeli, logiko-lingvisticheskie i analiticheskie regulatory // Datchiki i sistemy. — 2017. — No. 1. — S. 4—19. (In Russian)]
7. *Васильев С.Н., Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф.* и др. Интеллектуальные системы управления и нечеткие регуляторы. Ч. 2. Обучаемые нечеткие регуляторы, нечеткие ПИД-регуляторы // Ibid. — № 2. — С. 3—12. [*Vasil'ev, S.N., Kudinov, Yu.I., Pashchenko, F.F., et al.* Intellektual'nye sistemy upravleniya i nechetkie regulatory. Ch. 2. Obuchaemye nechetkie regulatory, nechetkie PID-regulatory // Ibid. — No. 2. — S. 3—12. (In Russian)]
8. *Титов Ю.К., Филиппенков Р.Г., Хижняков Ю.Н.* Нейронно-нечеткий регулятор частоты вращения силовой турбины ТВД на базе ANFIS-сети // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 10. — С. 20—23. [*Titov, Yu.K., Filippenkov, R.G., Khizhnyakov, Yu.N.* Neironechetkii regulator chastoty vrashcheniya silovoi turbiny TVD na baze ANFIS-seti // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. — 2013. — No. 10. — S. 20—23. (In Russian)]
9. *Бураков М.В., Яковец О.Б.* Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. — 2015. — Т. 58, № 10. — С. 804—808. [*Burakov, M.V., Yakovets, O.B.* Nечetkoe upravlenie silovym gيروسkopicheskim priborom // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. — 2015. — Vol. 58, no. 10. — S. 804—808. (In Russian)]
10. *Боднер В.А.* Системы управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1973. — 506 с. [*Bodner, V.A.* Sistemy upravleniya letatel'nymi apparatami. — М.: Mashinostroyeniye, 1973. — 506 s. (In Russian)]
11. *Остославский И.В., Стразева И.В.* Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1969. — 499 с. [*Ostoslavskii, I.V., Strazheva, I.V.* Dinamika poleta. Traektorii letatel'nykh apparatov. — 2-e izd., pererab. i dop. — М.: Mashinostroyeniye, 1969. — 499 s. (In Russian)]
12. *Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чукулаев М.С.* Системы автоматического управления самолетом — М.: Машиностроение, 1987. — 240 с. [*Mikhalev, I.A., Okoemov, B.N., Chikulaev, M.S.* Sistemy avtomaticheskogo upravleniya samoletom. — М.: Mashinostroyeniye, 1987. — 240 s. (In Russian)]
13. *Лебедев А.А., Карабанов В.А.* Динамика систем управления беспилотных летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1965. — 528 с. [*Lebedev, A.A., Karabanov, V.A.* Dinamika sistem upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami. — М.: Mashinostroyeniye, 1965. — 528 s. (In Russian)]
14. *Обновов В.Б., Воронов Е.М.* и др. Стабилизация, наведение, групповое управление и системное моделирование беспилотных летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1965. — 240 с. [*Obnovov, V.B., Voronov, E.M., et al.* Stabilizatsiya, navedeniye, gruppovoye upravleniye i sistemnoye modelirovaniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov. — М.: Mashinostroyeniye, 1965. — 240 s. (In Russian)]

- лотных летательных аппаратов. Современные подходы и методы: в 2 т. / под ред. Е.М. Воронова, Е.А. Микрина, Б.В. Обносова. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. — 464 с. [Obnosov, V.B., Voronov, E.M., et al. Stabilizatsiya, navedeniye, gruppovoye upravleniye i sistemnoye modelirovaniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Sovremennyye podkhody i metody: 2 t. / pod red. E.M. Voronova, E.A. Mikrina, B.V. Obnosova. — М.: Izdatel'stvo MG TU im. N.E. Bauman, 2018. — 464 s. (In Russian)]
15. Бесекиерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Профессия, 2007. — 752 с. [Besekierskii, V.A., Popov, E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. — 4-e izd., pererab i dop. — SPb.: Professiya, 2007. — 752 s. (In Russian)]
 16. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; Пер. с англ. Б.И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. — 832 с. [Dorf, R. Sovremennyye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop; Per. s angl.: B.I. Kopylova. — М.: Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2004. — 832 s. (In Russian)]
 17. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Некоторые проблемные аспекты нечеткого ПИД регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2018. — Т. 19, № 12. — С. 762—769. [Filimonov, A.B., Filimonov, N.B. Nekotorye problemnyye aspekty nechetkogo PID regulirovaniya // Me-khatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. — 2018. — Vol. 19, no. 12. — P. 762—769. (In Russian)]
 18. Лысенко Л.Н., Кыонг Н.Д., Чыонг Ф.В. Моделирование движения дистанционно пилотируемого ЛА с модифицированным нечетким регулятором в контуре управления полетом // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. — 2013. — № 2. — С. 24—30. [Lysenko, L.N., Kyong, N.D., Chyong, F.V. Modelirovanie dvizheniya distantsionno pilotiruemogo LA s modifitsirovannym nechetkim regulyatorom v konture upravleniya poletom // Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal. — 2013. — No. 2. — P. 24—30. (In Russian)]
 19. Ульянов Г.Н., Иванов С.А., Владыко А.Г. Модель канала управления беспилотного летательного аппарата с нечетким контроллером // Информационно-управляющие системы. — 2012. — № 4. — С. 70—73. [Ul'yanov, G.N., Ivanov, S.A., Vla-dyko, A.G. Model' kanala upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata s nechetkim kontrollerom // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. — 2012. — No. 4. — S. 70—73. (In Russian)]
 20. Матвеев Е.Н., Глинчиков В.А. Нечеткий логический вывод в системе управления беспилотного летательного аппарата // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. — 2011. — № 4. — С. 79—91. [Matveev, E.N., Glinchikov, V.A. Nchetkii logicheskii vyvod v sisteme upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. — 2011. — No. 4. — S. 79—91. (In Russian)]
 21. Первушина Н.А., Доновский Д.Е., Хакимова А.Н. Разработка методики синтеза нейро-нечеткого регулятора с настройкой генетическим алгоритмом // Вестник концерна ВКО «Алмаз — Антей». — 2018. — № 4. — С. 82—90. [Pervushina, N.A., Donovskii, D.E., Khakimova, A.N. Razrabotka metodiki sinteza neuro-nechetkogo regulyatora s nastroykoi geneticheskimi algoritmom // Vestnik Kontserna VKO «Almaz — Antei». — 2018. — No. 4. — S. 82—90. (In Russian)]
 22. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. — 10-е изд., стереотип. — М.: Академия, 2005. — 576 с. [Venttsel', E.S. Teoriya veroyatnostei: uchebnik dlya vuzov. — 10-e izd., stereotip. — М.: Akademiya, 2005. — 576 s. (In Russian)]
- Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Ф. Пащенко.
- Поступила в редакцию 1.10.2019, после доработки 3.06.2020.
Принята к публикации 15.06.2020.
- Первушина Наталья Александровна — канд. физ.-мат. наук,
✉ p-n-a100678@yandex.ru,
Хакимова Алиса Наилевна — инженер-исследователь,
✉ alice_hakimova@mail.ru,
- Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина», г. Снежинск.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF FUZZY CONTROLLERS SET BY GENETIC ALGORITHM TO STABILIZE DYNAMIC OBJECT

N.A. Pervushina¹, A.N. Khakimova²

Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

¹✉ p-n-a100678@yandex.ru, ²✉ alice_hakimova@mail.ru

Abstract. The paper presents mathematical models of two fuzzy controllers used to stabilize a dynamic object (e.g. statically unstable aircraft in the pitch channel). The controllers are different in structure and operating principle. They are set by using the genetic algorithm. The first controller is based on the training set, the second one — on the rules of fuzzy arithmetic. The design algorithms and mathematical models of the controllers are provided. The structure and operating principle of the genetic algorithm used to set the parameters of the fuzzy controllers of both types are described. The tests were conducted to study the behavior of the developed genetic algorithm in various modes; the best combinations of the controller parameters values were determined. The work also covers the results of mathematical modeling of the attitude control system operation with the proposed types of fuzzy controllers after their setting is performed, for the case when the aircraft is affected by random perturbations. The attitude control system equipped with the designed controllers showed better speed of response compared to the conventional control system. The approach proposed to design fuzzy controllers is recommended for solving the problems of stabilizing the non-linear unstable dynamic object with switching control modes.

Keywords: dynamic object, fuzzy controller, PID controller, genetic algorithm, stabilization system, pitch channel, statically unstable aircraft.