

УДК 681.51

# МОДЕЛЬ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С НЕЧЕТКИМ ЛОГИЧЕСКИМ КОНТРОЛЛЕРОМ

**Г. Н. Ульянов,**

доктор техн. наук, профессор

**С. А. Иванов,**

канд. техн. наук

Михайловская военная артиллерийская академия, г. Санкт-Петербург

**А. Г. Владыко,**

канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматривается модель канала управления с нечетким логическим контроллером в системе управления беспилотного летательного аппарата. Формируется методика проектирования модели системы регулирования с нечетким логическим контроллером. Приводятся результаты имитационного моделирования системы с нечетким логическим контроллером.

**Ключевые слова** — система управления, беспилотный летательный аппарат, нечеткая логика.

## Введение

Функционирование навигационно-управляющих комплексов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) направлено на решение двух задач: определение координат БПЛА в пространстве и управление им по навигационным параметрам. Известны универсальные решения задачи навигации [1], в то же время оптимальное решение задачи управления полетом испытывает значительные трудности, связанные с применением классической теории управления и регулирования [2].

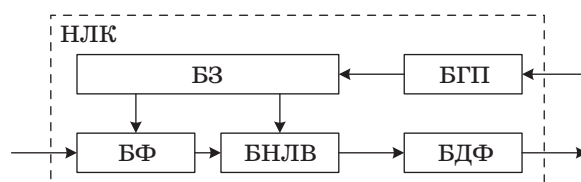
Перспективным направлением развития вопросов пилотирования является применение нечеткого логического вывода в системе управления БПЛА [3]. Нечеткий логический вывод позволяет использовать для управления информацию качественного характера, которую невозможно формализовать при реализации традиционных законов регулирования. При этом нечеткое регулирование оказывается малочувствительным к возмущениям в определенном диапазоне и демонстрирует лучшие характеристики по сравнению с классическими регуляторами.

## Нечеткий логический контроллер

Рассмотрим модель системы управления с нечетким логическим контроллером (НЛК) при вводе его в систему управления БПЛА в качестве альтернативы классическим регуляторам. В этом случае НЛК осуществляет оценку входящих воздействий, например ошибку регулирования и ее производную, и выбор управляющего сигнала в соответствии с заданным алгоритмом управления.

Функциональная схема НЛК представлена на рис. 1.

Блок фазификации реализует преобразование входных сигналов в лингвистические перемен-



■ **Рис. 1.** Функциональная схема НЛК: БЗ — база знаний; БФ — блок фазификации; БНЛВ — блок нечеткого логического вывода; БГП — блок генерации параметров; БДФ — блок дефазификации

ные, заданные на терм-множестве допустимых значений посредством функций принадлежности.

Известно, что для НЛК, функционирующего в качестве регулятора, более эффективной является его настройка по методу Такаги — Сугено.

Тогда нечеткий логический вывод в соответствии с работой [4] реализуется следующим образом:

$$\bigcup_{r=1}^{l_j} \left( \bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jr} \right) \rightarrow y = b_{j0} + \sum_{i=1, n} b_{ji} \cdot x_i; \quad j=1, m, \quad (1)$$

где  $x_i$  — входная переменная;  $y$  — выходная переменная;  $a_{i,jr} = \mu_{jr}(x_i) / x_i$  — нечеткое терм-множество, принадлежность к которому переменной  $x_i$  определяется посредством функции принадлежности  $\mu_{jr}(x_i)$ ;  $b_{ji}$  — настраиваемые коэффициенты.

Продукции в БЗ реализуют набор линейных законов управления, при этом одновременно могут выполняться несколько законов с различными степенями принадлежности.

Степени принадлежности входных переменных  $x_i$  к значениям выходной переменной  $d_j = b_{j0} + \sum_{i=1, n} b_{ji} \cdot x_i$  рассчитываются как

$$\mu_{d_j} = \bigcup_{r=1, k_j} w_{jr} \bigcap_{i=1, n} [\mu_{jr}(x_i)], \quad j=1, m, \quad (2)$$

где  $w_{jr}$  — вес терм-множества.

В результате получаем нечеткое множество  $\bar{y}$ , соответствующее входному вектору  $\mathbf{X}$ :

$$\bar{y} = \frac{\mu_{d_1}(\mathbf{X})}{d_1} + \frac{\mu_{d_2}(\mathbf{X})}{d_2} + \dots + \frac{\mu_{d_m}(\mathbf{X})}{d_m}. \quad (3)$$

Блок дефазификации вычисляет результирующее значение выхода  $y$  посредством дефазификации нечеткого множества  $\bar{y}$ , как взвешенное среднее.

Проблема создания БЗ представляет одну из ключевых задач при построении НЛК. Для ее решения используются разные методы, такие как опрос экспертов, отслеживание желаемой траектории управления, анализ характеристик замкнутой системы.

В данной работе отмеченная проблема решается за счет частичной автоматизации процесса анализа характеристик замкнутой системы и процесса синтеза БЗ. Параметры НЛК, а именно область определения входных переменных, количество терм-множеств, количество продукций БЗ, вид функций принадлежности, определяются посредством БГП через адаптивную сеть нечеткого вывода.

Реализованная в системе MatLab адаптивная сеть нечеткого вывода представляет собой систему нечеткого вывода Такаги — Сугено в виде пя-

тислонной нейронной сети прямого распространения. Для обучения сети применяется алгоритм обратного распространения ошибки или сочетания метода наименьших квадратов с алгоритмом обратного распространения.

Особенностью подхода является наличие этапа дополнительной настройки функций принадлежности в антецедентах и консеквентах продукций.

Таким образом, методика проектирования модели системы регулирования с НЛК сводится к следующему:

1) производится выбор исходного варианта желаемой траектории на прототипе замкнутой системы управления, например с ПИ-регулятором и объектом третьего порядка;

2) в качестве входных измеряемых координат выбирается ошибка и производная ошибки регулирования, а в качестве выходной координаты — выход ПИ-регулятора;

3) при моделировании данные входов и выхода записываются в файл в виде матрицы с заданным шагом;

4) вводится полученная матрица в БГП на генерирование параметров НЛК;

5) тестируется модель системы с НЛК и при необходимости проводится дополнительная настройка параметров НЛК по требуемым показателям качества.

## Система управления каналом БПЛА с НЛК

Для обеспечения полной автоматизации управления полетом необходимы каналы управления двигателем, рулем высоты, элеронами, рулем направления.

Канал управления двигателем осуществляет регулирование тяги в соответствии с заданной программой полета. Три других канала управления обеспечивают необходимое угловое положение аппарата в пространстве.

Ограничимся в данной статье рассмотрением системы регулирования с НЛК в канале управления двигателем.

Положение дроссельной заслонки изменяет режим работы двигателя и таким образом воздействует на тягу винта и на скорость полета.

Передаточная функция БПЛА по скорости, выраженная через линеаризованные коэффициенты, имеет вид

$$W_{\delta_{др}}^{V_k} = \frac{K_{\delta_{др}}^{V_k 3} s^3 + K_{\delta_{др}}^{V_k 2} s^2 + K_{\delta_{др}}^{V_k 1} s^1 + K_{\delta_{др}}^{V_k 0}}{D_p^{s4} s^4 + D_p^{s3} s^3 + D_p^{s2} s^2 + D_p^{s1} s^1 + D_p^{s0}}, \quad (4)$$

где  $K_{\delta_{др}}^{V_k j}$  и  $D_p^{si}$  — коэффициенты  $B$  и  $A$  матриц коэффициентов линеаризованной модели  $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}$ .

Значения коэффициентов зависят от параметров вектора состояния  $X$  и вектора управления  $U$ , геометрических и массо-инерционных характеристик БПЛА, параметров атмосферы и скорости ветра.

Введем ограничения по опорной траектории и типу БПЛА. Выберем прямолинейный горизонтальный полет в качестве опорной траектории и параметры рассмотренного в работе [5] крылатого малоразмерного БПЛА самолетной схемы среднего радиуса действия со стартовой массой до 100 кг.

Тогда имеем следующие параметры вектора состояния в опорной точке:

- модуль истинной скорости БПЛА в нормальной земной системе координат  $V_k = 44$  м/с;
- высота полета  $H = 1000$  м;
- угол атаки  $\alpha_k = 0,03665$  рад;
- угол скольжения  $\beta_k = 0$  рад;
- угол отклонения дроссельной заслонки  $\delta_{др} = 0,8203$  рад;
- углы отклонения руля высоты, руля направления, правого и левого элеронов  $\delta_{р.в} = \delta_{р.н} = \delta_{п.э} = \delta_{л.э} = 0$  рад;
- угловые скорости  $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$  рад/с;
- траекторный угол крена  $\gamma_k = 0$  рад;
- угол наклона траектории  $\Theta = 0$  рад;
- скорости ветра  $W_x = W_y = W_z = 0$  м/с.

Структурная схема системы управления скоростью БПЛА с ПИ-регулятором представлена на рис. 2.

Коэффициенты ПИ-регулятора подобраны из условия минимального изменения амплитудно-фазовой частотной характеристики в области частоты среза.

Переходные характеристики разгона БПЛА и изменения положения дроссельной заслонки показаны на рис. 3.

Для синтеза параметров НЛК выбираем в качестве входных измеряемых координат ошибку и производную ошибки регулирования, а в качестве выходной координаты — выход ПИ-регулятора.

Тогда для двух входных переменных, системы с полным перебором продукции и одной выходной переменной получим в соответствии с (1) модель Такаги — Сугено первого порядка

$$\bigcup_{r=1}^n \left( \bigcap_{i=1}^2 x_i = a_{i,jr} \right) \rightarrow y = b_{j0} + b_{j1}x_i, \quad j=1, m, \quad (5)$$

где  $b_{j0}$  и  $b_{j1}$  — аналоги коэффициентов усиления пропорционального и интегрального каналов ПИ-регулятора.

Построим структурную схему системы управления скоростью БПЛА с НЛК (рис. 4).

По результатам моделирования получаем идентичные переходные характеристики разгона БПЛА с НЛК и ПИ-регулятором.

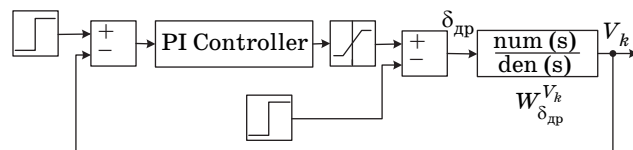


Рис. 2. Структурная схема системы управления скоростью БПЛА с ПИ-регулятором

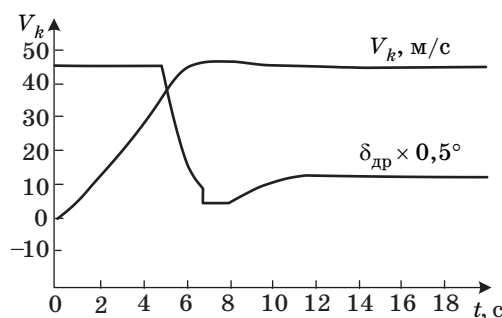


Рис. 3. График изменения скорости полета БПЛА и положения дроссельной заслонки с ПИ-регулятором

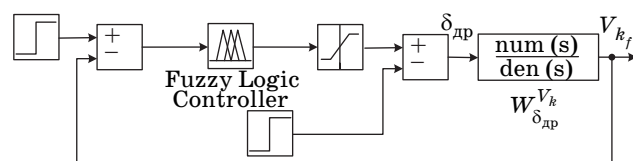


Рис. 4. Структурная схема системы управления скоростью БПЛА с НЛК

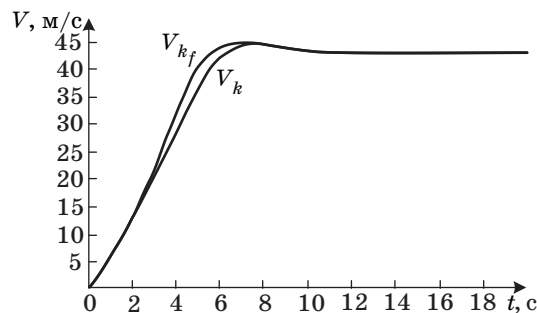


Рис. 5. Сравнительные переходные характеристики разгона БПЛА с ПИ-регулятором и НЛК

Применим тонкую настройку параметров НЛК в целях обеспечения повышенного быстродействия системы в пределах границ устойчивости.

Сравнительные переходные характеристики разгона БПЛА с ПИ-регулятором ( $V_k$ ) и НЛК ( $V_{kf}$ ) приведены на рис. 5.

Из графика видно, что выход на заданную скорость система с НЛК выполняет быстрее, имеет место перерегулирование по скорости, аналогичное системе с ПИ-регулятором, статическая ошибка отсутствует.

Исследования при меньших изменениях заданной скорости показали отсутствие перерегулирования.

## Заключение

Существующие в настоящее время методы синтеза систем управления БПЛА заключаются в анализе и доводке структуры регуляторов с приближенными параметрами с использованием нелинейной модели БПЛА.

Приведенная в данной статье методика синтеза регулирующего органа облегчает задачу про-

ектирования систем управления БПЛА, обеспечивающих требуемый режим в соответствии с программой полета.

Полученные результаты имитационного моделирования системы с НЛК в канале управления двигателем свидетельствуют о правомерности выбранного подхода и позволяют рассматривать возможность построения взаимосвязанной системы управления по всем каналам управления.

Исследования проводились в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

## Литература

1. Владыко А. Г., Иванов С. А., Ульянов Г. Н. Оценка точности определения координат БПЛА модифицированными разностно-дальномерным и дальномерным методами // Морская радиоэлектроника. 2011. № 4. С. 8–11.
2. Голубев И. С. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов (дистанционно-пилотируемые летательные аппараты). — М.: МАИ, 2006. — 524 с.
3. Матвеев Е. В., Глинчиков В. А. Нечеткий логический вывод в системе управления беспилотного летательного аппарата // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и Технологии. 2011. № 4. С. 79–91.
4. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (дата обращения: 01.01.2012).
5. Фролова Л. Е. Синтез автопилота беспилотного летательного аппарата заданного класса на основе многоуровневой системы критериев оптимальности: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. — Рыбинск, 2008. — 160 с.