УДК. 62-503.57 DOI: 10.31799/2077-5687-2025-1-46-56

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Е. С. Костыгов
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Проведён расчёт и моделирование ПИД-регулятора, использующегося для стабилизации углового положения летательного аппарата самолётного типа. Для вычислений параметров был использован метод Циглера-Никольса и его модификация, а также метод амплитудного оптимума. Сделан вывод о необходимости применения новых адаптивных алгоритмов управления для автоматической настройки регулятора. В качестве адаптивной управляющей системы предложено использовать самонастраивающийся тип систем, а в качестве контура адаптации – алгоритмы искусственного интеллекта.

Ключевые слова: адаптивное управление, возмущающие воздействия, методы адаптации, летательный аппарат, искусственный интеллект.

Для цитирования:
Костыгов, Е. С. Исследование методов параметрического синтеза систем автоматического управления летательных аппаратов / Е. С. Костыгов // Системный анализ и логистика. – 2025. – № 1(44). – с. 46-56. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-1-46-56.

Введение

Автоматическое управление достаточно широко распространено в настоящее время, в том числе и в беспилотной авиации, так как для осуществления управления летательным аппаратом (ЛА) самолётного типа (особенно на этапах взлёта и посадки) от оператора требуются большие профессиональные навыки [1, 2, 3]. Однако при эксплуатации сложного динамического объекта, каковым и является летательный аппарат, возможно неконтролируемое изменение его параметров в достаточно широком интервале, что сильно усложняет параметрический синтез контура управления на этапе его проектирования [4, 5]. В качестве регулятора чаще всего используется ПИД-регулятор. Вычисление его параметров с помощью традиционных методов не дает возможности получить оптимальные значения, так как эти методы дают результат только в первом приближении [6, 7]. Необходимость в большом объёме априорной информации о возмущающих факторах (ветер, турбулентность) ещё больше усложняет решение поставленных задач. В настоящее время активно проводятся исследования по внедрению искусственного интеллекта во многие производственные сферы [8, 9]. Таким образом, данное исследование посвящено рассмотрению необходимости адаптации параметров ПИД-регулятора, использующегося для управления угловым положением ЛА, с помощью технологий искусственного интеллекта.

Метод Циглера-Никольса

Известно 2 варианта синтеза параметров ПИД-регулятора по методу Циглера-Никольса. Главная их особенность – расчёт параметров регулятора по эмпирическим формулам [10, 11, 12]. Первый вариант предполагает, что коэффициенты K_d, K_i равны 0 [10, 11]. Учитывается только коэффициент K_p, который увеличивается до того момента, пока система управления не перейдёт в автоколебательный режим [12, 13]. После этого определяется период T автоколебаний. Полученный коэффициент чаще всего обозначают как K^*_p. Параметры ПИД-регулятора вычисляются по эмпирическим формулам следующего вида [11, 14]:

$$K_p = 0{,}6K_p^* \tag{1}$$

$$K_i = \frac{1{,}2K_p^*}{T^*} \tag{2}$$

$$K_d = 0{,}075 K_p^* T^* \tag{3}$$

Критерием оптимальности является значение декремента затухания, которое равно D = 0,2…0,3 [15]. Его можно рассчитать следующим образом [14]:

$$D = \frac{lg \frac{y_n}{y_{n+0,5}}}{\sqrt{\pi^2 + \left(ln \frac{y_n}{y_{n+0,5}}\right)^2}} \tag{4}$$

где D – декремент затухания; y_n и $y_{n+0,5}$ – амплитуда n-го колебания и амплитуда колебания, отстоящего на половину периода от n-колебания соответственно.

Рассмотрим астатический контур управления углом тангажа ЛА. Передаточная функция ЛА по углу тангажа имеет следующий вид [16, 17]:

$$W(p) = \frac{\vartheta(p)}{\delta_B(p)} = \frac{k\left(p + n_{22}\right)}{p\left(T^2 p^2 + 2d_0 Tp + 1\right)} \tag{5}$$

где δ_B – угол поворота руля высоты; υ – угол тангажа; n_{22} – параметр ЛА; T – постоянная времен; d – коэффициент демпфирования; k – коэффициент передачи звена.

Схема моделирования в MatLab/Simulink представлена на рисунке 1. Коэффициенты передаточной функции были взяты из материала – [18].

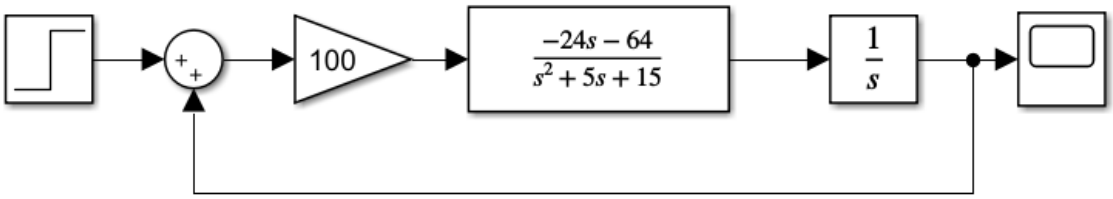

Рис. 1. Схема моделирования контура управления углом тангажа

На рисунке 2 показана переходная характеристика (реакция на единичное ступенчатое воздействие на входе) контура управления углом тангажа.

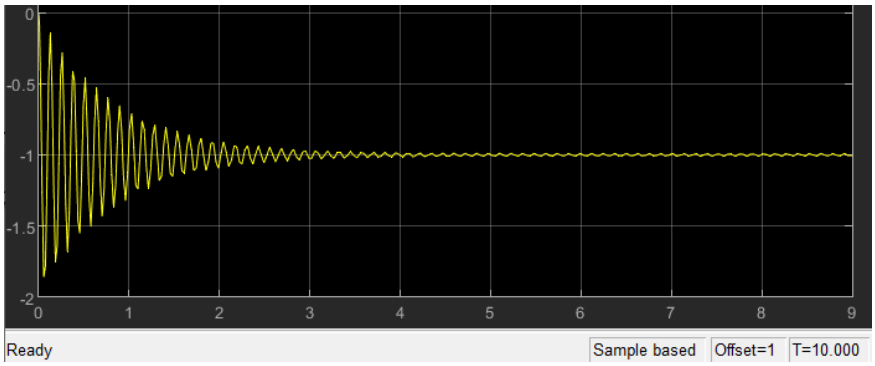

Рис. 2. Переходная характеристика контура управления углом тангажа

При коэффициенте K^*_p, равном 100, и при дальнейшем его увеличении контур управления углом тангажа продолжает оставаться устойчивым. Следовательно, первый вариант метода Циглера-Никольса не подходит для настройки параметров ПИД-регулятора, использующегося для управления углом тангажа.

Модифицированный метод Циглера-Никольса

Алгоритм данного метода заключается в построении переходной характеристики объекта управления и аппроксимирующей прямой к ней, вычислении сдвига аппроксимирующей прямой по оси У и по оси Х [11, 13, 14]. Параметры ПИД-регулятора рассчитываются следующим образом:

$$K_p = 1{,}2a \tag{6}$$

$$K_i = \frac{2L}{K_p} \tag{7}$$

$$K_d = \frac{0{,}5L}{K_p} \tag{8}$$

где а – сдвиг аппроксимирующей прямой по оси ординат; L – смещение аппроксимирующей прямой по оси абсцисс.

Для моделирования использована схема, изображённая на рисунке 1, с коэффициентом передачи, равным 5. На рисунке 3 показана переходная характеристика объекта управления (в соответствии с формулой (5)) и аппроксимирующая прямая.

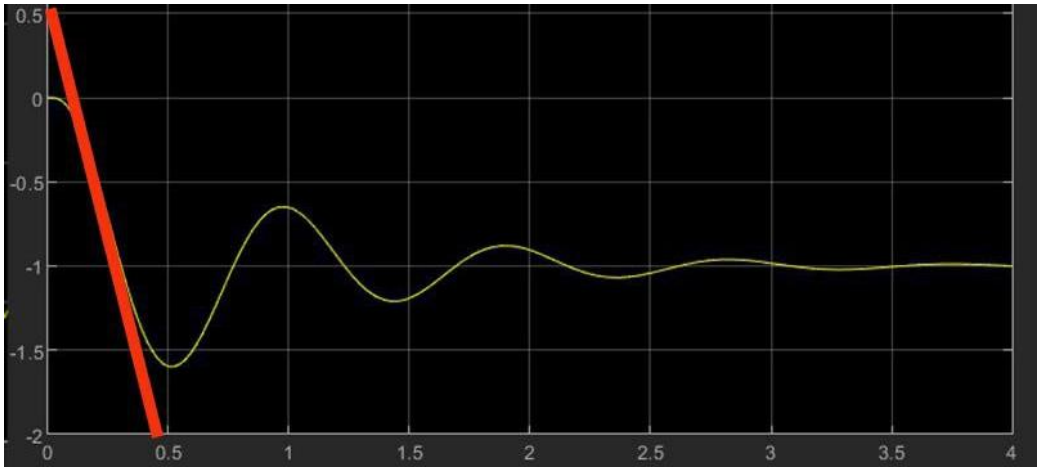

Рис. 3. Переходная характеристика и аппроксимирующая прямая

Исходя из графика, можно сделать вывод, что сдвиг аппроксимирующей прямой по оси ординат равен а = 0,5, по оси абсцисс L = 0,4 с. По выражениям (6), (7), (8) вычислим коэффициенты ПИД-регулятора: K_p = 0,6, K_i = 1,33, K_d = 0,33. Схема моделирования с рассчитанными данными представлена на рисунке 4.

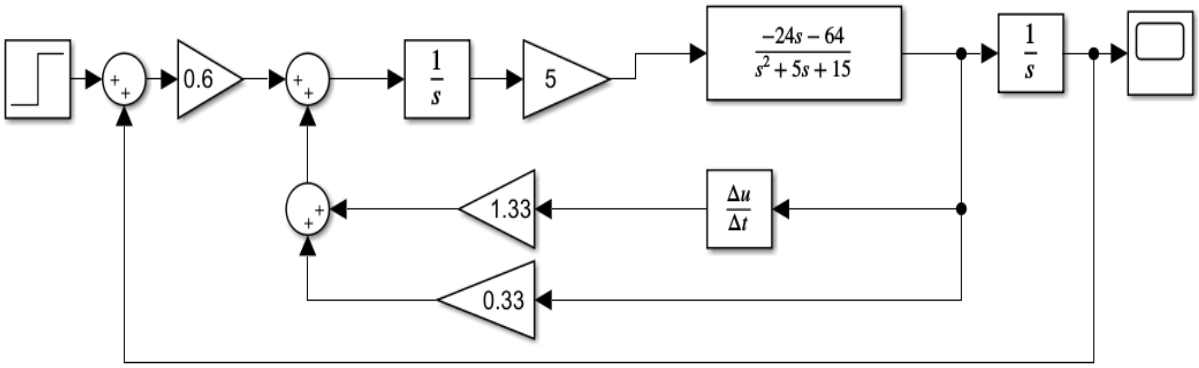

Рис. 4. Схема моделирования контура управления углом тангажа с рассчитанными коэффициентами ПИД-регулятора

Переходная характеристика представлена на рисунке 5.

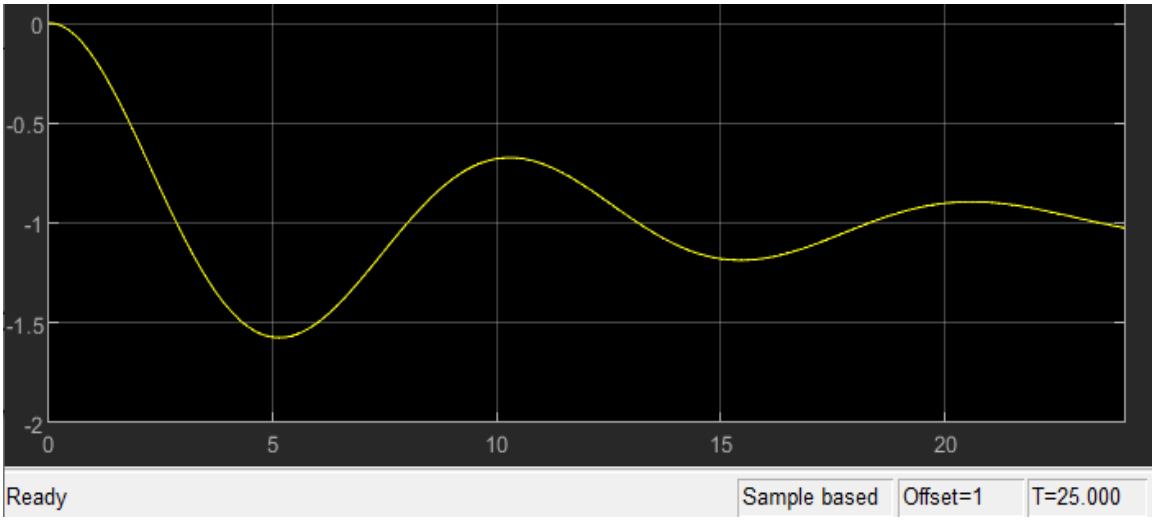

Рис. 5. Переходная характеристика контура управления углом тангажа с рассчитанными коэффициентами ПИД-регулятора

Как видно из рисунка 5, время переходного процесса контура управления с вычисленными коэффициентами равняется примерно 25 секундам, что не является допустимым для систем автоматического управления полётом. Декремент затухания при этом равен (формула 4):

$$D = \frac{lg\dfrac{y_n}{y_{n+0,5}}}{\sqrt{\pi^2 + \left(ln\dfrac{y_n}{y_{n+0,5}}\right)^2}} = \frac{lg\dfrac{1,6}{0,6}}{\sqrt{\pi^2 + \left(ln\dfrac{1,6}{0,6}\right)^2}} = 0,64$$

Полученное значение декремента затухания не соответствует значению критерия оптимальности, предложенному Циглером и Никольсом.

Таким образом, второй вариант метода Циглера-Никольса не даёт возможности произвести оптимальный параметрический синтез ПИД-регулятора, потому что в данном методе никак не учитываются требования к запасу устойчивости управляющей системы.

Метод амплитудного оптимума

В общем случае передаточная функция объекта управления выглядит следующим образом:

$$W(p) = k\frac{1 + b_1 p + b_2 p^2 + \ldots + b_m p^m}{1 + a_1 p + a_2 p^2 + \ldots + a_n p^n} e^{-pt} \tag{9}$$

где k, $a_1 \ldots a_n$, $b_1 \ldots b_m$ – коэффициенты передаточной функции; – коэффициент передачи; t – чистое запаздывание.

Параметры регулятора в рассматриваемом методе вычисляются в соответствии со следующей формулой [12, 19]:

$$\begin{pmatrix} K_p \\ K_i \\ K_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -A_1 & A_0 & 0 \\ -A_3 & -A_2 & -A_1 \\ -A_5 & A_4 & -A_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -0,5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{10}$$

где $A_1 \ldots A_5$ – коэффициенты обратной матрицы.

Коэффициенты обратной матрицы можно рассчитать по формулам:

$$A_0 = k \tag{11}$$

$$A_1 = k\left(a_1 - b_1 + t\right) \tag{12}$$

$$A_n = k\left(-1\right)^{n+1}\left(a_n - b_n\right) + \sum_{i=1}^{n}\left(-1\right)^{n+i}\frac{t^i b_{n-i}}{i!} + \sum_{i=1}^{n-1}\left(-1\right)^{n+i-1} A_i a_{n-i} \tag{13}$$

Для выполнения необходимых вычислений и проведения моделирования в MatLab/Simulink рассмотрим передаточную функцию ЛА по углу тангажа (формула 5). Для удобства расчёта преобразуем её:

$$W(p) = \frac{\vartheta(p)}{\delta_B(p)} = \frac{5\left(-24p - 64\right)}{p\left(p^2 + 5p + 15\right)} = \frac{-320\left(0,375p + 1\right)}{15p\left(0,067p^2 + 0,33p + 1\right)} =$$
$$= \frac{-21,33\left(0,375p + 1\right)}{0,067p^3 + 0,33p^2 + p}$$

Следовательно, коэффициенты передаточной функции в соответствии с формулой (9) равны: $a_1 = 1$, $a_2 = 0,33$, $a_3 = 0,067$, $b_1 = 0,375$, k = -21,33, чистое запаздывание равно 0.

По формулам (11), (12), (13) рассчитаем коэффициенты матрицы из уравнения (10): A_0 = -21,33, A_1 = -13,33, A_2 = -6,29, A_3 = -3,32, A_4 = -2,14, A_5 = -1,47.

Подставим их в формулу (10):

$$\begin{pmatrix} K_p \\ K_i \\ K_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -13,33 & -21,33 & 0 \\ -3,32 & -6,29 & -13,33 \\ -1,47 & -2,14 & -3,32 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -0,5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Параметры ПИД-регулятора будут равны: K_p =0,0134, K_i = -0,0151, K_d = 0,0037.

Схема моделирования, учитывающая вычисленные параметры, показана на рисунке 6, переходная характеристика контура управления углом тангажа – на рисунке 7.

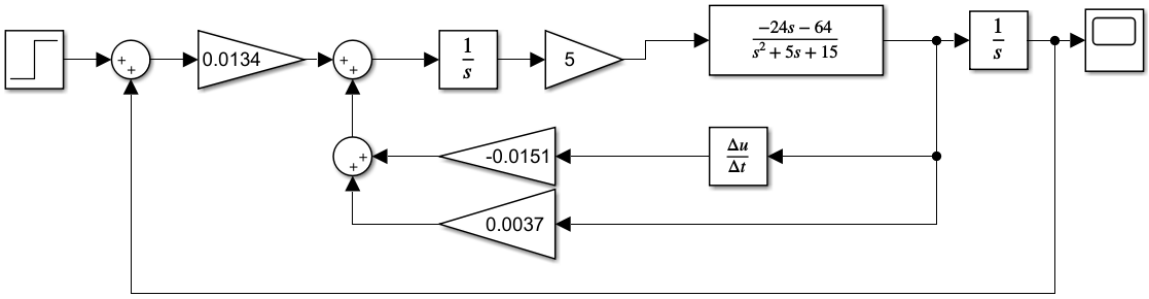

Рис. 6. Схема моделирования

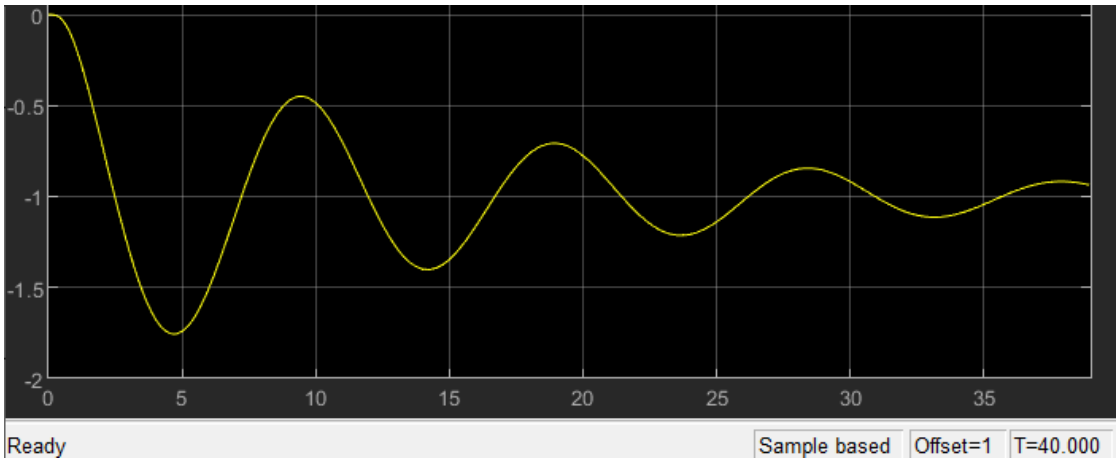

Рис. 7. Переходная характеристика системы

Как видно из рисунка 7, быстродействие смоделированной системы равняется примерно 40 секундам, что не является допустимым для систем автоматического управления полётом, особенно на этапах взлёта и посадки.

Таким образом, синтез методом амплитудного оптимума не даёт возможности получить оптимальные параметры ПИД-регулятора для управления ЛА.

Рассмотренные методы широко применяются в технике при управлении различными объектами благодаря своей простоте. Но в то же время эти методы невозможно использовать для сложных динамических систем, например, летательного аппарата. Они имеют место только при синтезе более простых регуляторов, для которых не требуются высокие показатели качества [6].

Известно ещё много других методов настройки параметров ПИД-регулятора: методы Коэна-Куна, Чина–Хронеса-Ресвика, Шубладзе, Астрёма-Хагглюнда, Стогестада, Шеделя и т.д., с помощью которых также можно найти лишь начальное приближение искомых параметров [20]. Для получения нужного качества управления крайне важно настраивать вычисленные коэффициенты с помощью численной оптимизации, которая правильно работает только в небольшой окрестности оптимального значения параметров регулятора [6].

Главный недостаток всех перечисленных традиционных методов заключается в том, что эти методы не дают возможности учитывать нежелательные изменения параметров ЛА во времени, которые могут возникать из-за влияния случайных внешних возмущающих факторов. Поэтому параметры ПИД-регулятора, даже близкие к оптимальным, не гарантируют ни обеспечение требуемых показателей качества управления в реальных

условиях эксплуатации, ни устойчивость самой системы управления [21]. Следовательно, можно сделать вывод о необходимости разработки новых методов синтеза, которые позволили бы настраивать коэффициенты регулятора автоматически в процессе эксплуатации. Одно из наиболее частых решений – применение адаптивных алгоритмов управления [6, 20, 21].

Методы адаптации

Управление в условиях параметрических и непараметрических внешних возмущающих воздействий является одной из главных и сложных проблем современной теории автоматического управления [22]. Введение контура адаптации позволяет улучшить прямые и частотные показатели качества автоматической управляющей системы. В качестве контура адаптации в ПИД-регуляторах используется алгоритм настройки параметров K_p, K_i, K_d (рисунок 10).

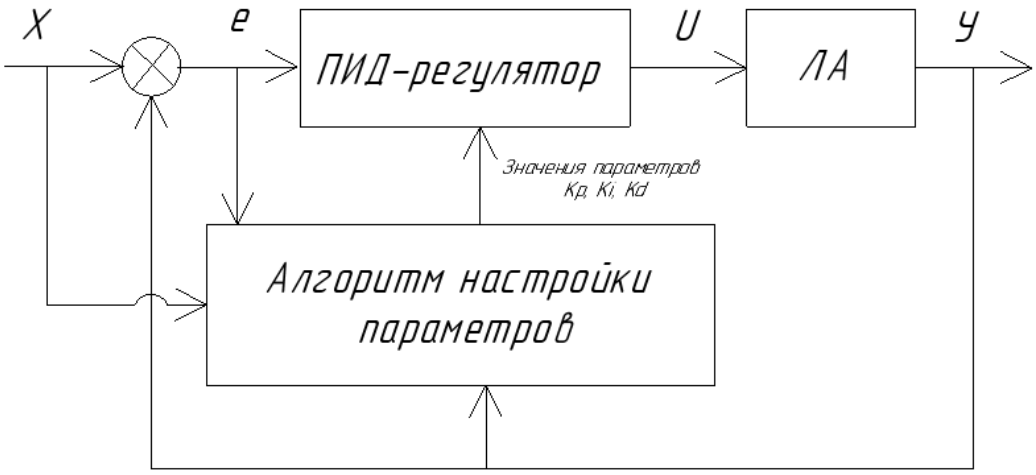

Рис. 10. Обобщённая схема адаптивного ПИД-регулятора [4, 8]

где X – требуемое значение управляемой величины; e – ошибка управления; U – управляющее воздействие на органы управления ЛА; Y – фактическое значение управляемой величины.

Задача адаптации в этом случае может быть сформулирована следующим образом [23]: адаптивный ПИД-регулятор при полном отсутствии априорной информации должен формировать такое задающее воздействие на органы управления ЛА, чтобы показатели качества системы управления были равны показателям, заданным на этапах разработки и проектирования. В системах с ПИД-регулятором этого можно добиться с помощью автоматической настройки параметров K_p, K_i, K_d адаптивными алгоритмами в реальном масштабе времени.

Адаптивные системы делятся на две большие группы: самоорганизующиеся и самонастраивающиеся. Самоорганизующиеся системы управления используются для тех объектов, порядок которых неизвестен заранее или может изменяться. В таких системах адаптируется структура регулятора в процессе эксплуатации [23]. Однако порядок ЛА по угловому положению известен уже на этапе проектирования: по углу тангажа – второй, по углу крена – первый [16]. Следовательно, целесообразно применять не самоорганизующиеся, а самонастраивающиеся системы управления, в которых адаптируются лишь коэффициенты регулятора.

Применение технологий искусственного интеллекта в задаче адаптации систем управления

Для построения алгоритма адаптации самонастраивающихся систем автоматического управления можно использовать методы искусственного интеллекта, например, искусственные нейронные сети или нечёткую логику. Они могут реализовываться в ПИД-регуляторах двумя разными способами [9, 24]: либо для построения самого регулятора, либо для построения блока настройки коэффициентов этого регулятора. Разница заключается в том, что при реализации нечёткого регулятора эксперт должен сформулировать правила принятия решений в лингвистических переменных, а при использовании нейронной сети этого не требуется. Необходимо лишь несколько раз самостоятельно осуществить настройку регулятора в процессе обучения нейронной сети.

Искусственный нейрон представляет собой математическую модель биологического нейрона. Он является базовым элементом для построения нейронных сетей. Искусственный нейрон имеет несколько входов n и единственный выход y. Каждый вход имеет вес, на который умножается поступивший сигнал. Далее внутри нейрона происходит суммирование всех взвешенных сигналов, а полученный в результате этого выходной сигнал (сумма) преобразуется с помощью нелинейной функции активации (передаточной функции нейрона), которая имеет вид [25]:

$$Y = F(S) \tag{14}$$

Выходной сигнал нейрона:

$$S = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b \tag{15}$$

где n — размерность входного вектора; wi — вес i-го входа нейрона; xi — значение, поступающее на i-й вход нейрона; b – постоянное смещение.

Схематично преобразование входных сигналов нейроном изображено на рисунке 11.

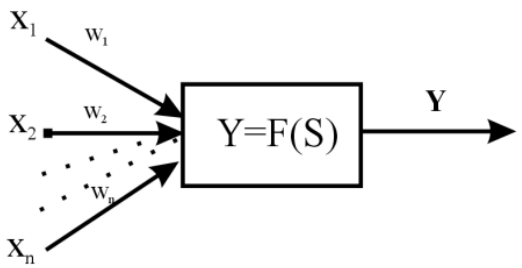

Рис. 11. Преобразование входных сигналов нейроном [25]

Функция активации может быть сигмоидальной, ступенчатой, в виде гиперболического тангенса и т.д. Общая структура искусственной нейронной сети представлена на рисунке 12.

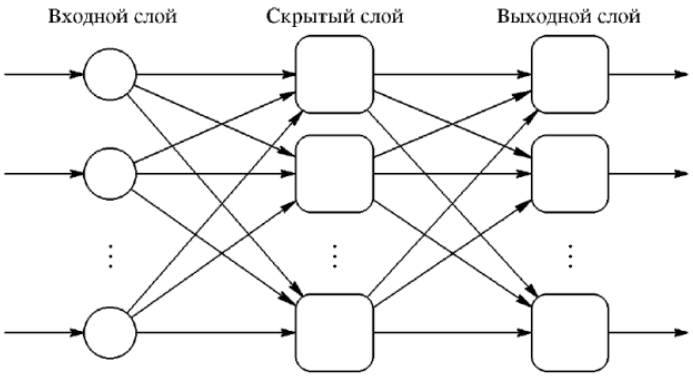

Рис. 12. Общая структура искусственной нейронной сети [25]

Заключение

В данной статье был проведён расчёт ПИД-регулятора, который используется для стабилизации угла тангажа ЛА, и его моделирование. Сделан вывод о невозможности использования традиционных методов настройки регулятора для решения поставленной задачи, так как аналитические расчёты дают результат лишь в первом приближении, после чего требуется дополнительная оптимизация параметров. Подчёркнута актуальность применения и исследования адаптивных алгоритмов управления угловым положением ЛА. В качестве контура адаптации предложено использовать алгоритмы искусственных нейронных сетей, которые достаточно широко внедряются во многие технические системы и производственные сферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Костыгов Е. С., Перлюк В. В.* Исследование современной интеллектуальной системы автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов с использованием технического зрения. // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сб. докл. пятой междунар. науч. конф. в 2 ч. ч. 1. – СПб.: ГУАП, 2024. – С. 102-106.
2. *Костыгов Е. С., Перлюк В. В.* Исследование способа автономного управления движением беспилотного летательного аппарата относительно взлётно-посадочной полосы с помощью обработки видеоизображения нейронными сетями. // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сб. ст. VI междунар. форума / под ред. академика РАН В. В. Окрепилова. – СПб.: ГУАП, 2024. – С. 142-143.
3. *Костыгов Е. С., Перлюк В. В.* Разработка бортовой системы автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов на основе метода компьютерного зрения. // Семьдесят седьмая Международная студенческая научная конференция ГУАП сб. докл.: в 5 ч. ч. 1 / Технические науки. – СПб.: ГУАП, 2024.– С. 49-52.
4. *Костыгов Е. С., Перлюк В. В.* Исследование методов нечёткой логики и искусственных нейронных сетей в задаче адаптации систем автоматического управления. // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сб. ст. VII Междунар. форума / под ред. академика РАН В. В. Окрепилова. – СПб.: ГУАП, 2025. – С. 180-181.
5. *Паленов М. В.* Адаптивные ПИД-регуляторы с конечно-частотной идентификацией: дис. ... канд. тех. наук. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2011 г. – 124 с.
6. *Цавнин А. В.* Синтез робастных регуляторов для систем с интервально-определенными параметрами, гарантирующих нулевое значение

перерегулирования: дис. ... канд. тех. наук. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2021 г. – 144 с.
7. *Михалевич С. С.* Частотный метод параметрического синтеза ПИД-регулятора для стационарных, интервальных и многосвязных САУ: дис. ... канд. тех. наук. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015 г. – 149 с.
8. *Евгенов А. А.* Нейросетевой регулятор системы управления квадрокоптером / А. А. Евгенов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – С. 61.
9. *Павленко Е. Н.* Самоорганизующиеся адаптивные системы управления с искусственным интеллектом / Е. Н. Павленко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013.– С. 153-161.
10. *Воробьев В. Ю.* Расчёт и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса / В. Ю. Воробьев, Г. В. Саблина // Автоматика и программная инженерия. – 2019. – №1 (27). – С. 9-14.
11. *Демин И. О.* Исследование методов настройки параметров ПИД-регуляторов / *И. О. Демин, Г. В. Саблина* // Автоматика и программная инженерия. – 2020. – №1 (31). – С. 174-180.
12. *Сидорова. А. А.* Определение наиболее эффективного метода настройки ПИД-регулятора / А. А. Сидорова // Информационные технологии в системах автоматизации. – 2012. – С. 143-150.
13. *Сидорова А. А.* Анализ эффективности алгоритмов автоматической настройки адаптивных промышленных ПИД-регуляторов / А. А. Сидорова, А. М. Малышенко // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. № 5. – С. 110-115.
14. *Коломыцев В. Г.* Модификация временного метода Циглера – Никольса и оптимизация параметров ПИД-регуляторов средствами MATLAB / В. Г Коломыцев, Г. И. Рустамханова // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-3. – С. 526-531.
15. *Мазуров В. М.* Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Часть 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах регулирования / В. М. Мазуров // Компоненты и технологии. – 2003. – № 5. – С. 59-62.
16. *Гриднев Ю. В.* Система автоматического управления беспилотного летательного аппарата / Ю. В. Гриднев, А. Н. Пальцев, Ю.Ф. Яцына, С.А Рак // Разработки ученых и специалистов. – С. 33-38.
17. *Гусев А. Н.* Системы автоматического управления самолетом: учеб. пособие / *А*. Н. Гусев. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т., 2004. – 138 с.
18. *Григорьев А. П.* Исследование астатического автопилота с помощью MATLAB/SIMULIN: метод. указания // А. П. Григорьев. – Спб: ГУАП, 2015. – 15 с.
19. *Маков С. В.* Обзор методов настройки ПИД-регулятора для системы позиционирования солнечных батарей / С. В. Маков, И. О. Гринев, А. А. Трофимов // Modern Science. – 2021. – №8. – С. 181-186.
20. *Ван Ва Хоанг* Исследование эффективности и развитие методов оптимизации динамики АСР тепловых объектов: дис. ... канд. тех. наук. – Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2018 г. – 198 с.
21. *Резков И. Г.* Адаптивные регуляторы с конечно-частотной идентификацией: дис. ... канд. тех. наук. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2021 г. – 144 с.
22. *Громов В. С.* Адаптивные алгоритмы управления в условиях параметрически неопределенных возмущающих воздействий: дис. ... канд. тех. наук. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2017 г. – 125 с.

23. *Гайдук А. Р.* Адаптивные системы управления: учеб. пособие / А. Р. Гайдук, Е. А. Плаксиенко. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2018 г. – 120 с.
24. *Денисенко В. В.* ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации / В. В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4.– С. 66-74.
25. *Гафаров Ф. М.* Искусственные нейронные сети и их приложения: учеб. пособие / Ф.М. Гафаров, А.Ф. Галимянов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Костыгов Егор Сергеевич
Магистрант
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: kostygov.egor17@yandex.ru