



Применение нейросетевого регулятора для повышения качества переходного процесса системы стабилизации высоты полета экраноплана

М. Е. Иванов^а, ассистент, orcid.org/0000-0002-7584-6946

Ю. Ф. Матасов^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0009-0003-2435-8365, yfmatasov@yandex.ru

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Введение: стабилизация по высоте полета экраноплана является одной из самых актуальных задач управления указанным типом летательного аппарата. Актуальность заключается в трудности организации данного процесса с требуемым уровнем качества в связи с целеполаганием безопасности полета вблизи подстилающей поверхности. **Цель:** преобразовать систему стабилизации высоты полета экраноплана и разработать для нее нейросетевой регулятор, который позволит улучшить качество переходного процесса системы; провести моделирование исходной и модернизированной систем стабилизации. **Результаты:** проведено моделирование с использованием Matlab Simulink работы классической и нейросетевой систем стабилизации высоты полета. По результатам моделирования достигнуто улучшение качества переходного процесса системы за счет уменьшения его колебательности и времени окончания. Для этого в схему системы управления добавлен регулятор NARMA-L2, использующий один из методов искусственного интеллекта – искусственную нейронную сеть. Настройка регулятора произведена с помощью обучения данной сети методом Левенберга – Марквардта после задания необходимых параметров структуры нейронной сети и формирования обучающей выборки. **Практическая значимость:** оптимальная настройка нейросетевого регулятора позволяет значительно улучшить качество переходного процесса системы стабилизации высоты полета экраноплана, особенно в том, что касается длительного времени достижения установившегося режима работы.

Ключевые слова – система стабилизации, методы искусственного интеллекта, нейросетевой регулятор, метод Левенберга – Марквардта, переходный процесс.

Для цитирования: Иванов М. Е., Матасов Ю. Ф. Применение нейросетевого регулятора для повышения качества переходного процесса системы стабилизации высоты полета экраноплана. *Информационно-управляющие системы*, 2024, № 6, с. 27–34. doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34, EDN: BOBWBN

For citation: Ivanov M. E., Matasov Yu. F. Neuro-controller for improving the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 27–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34, EDN: BOBWBN

Введение

Стабилизация высоты полета экраноплана является сложной технической задачей, сопряженной со значительным количеством трудностей, связанных с близостью подстилающей поверхности под корпусом судна [1–5]. Вследствие этого измерение высоты полета должно обеспечиваться с максимальной точностью при максимизации целевой функции безопасности полета. Видным современным ученым, занимающимся проблемами управления низколетящими аппаратами типа экраноплан, является Небылов Александр Владимирович; основные проблемы стабилизации и повышения точности измерения параметров полета описаны в его научных трудах [6–8]. Существенно повышает качество упомянутых систем применение перспективного математического аппарата – методов искусственного интеллекта [9–11], с помощью которых формируются передаточные функции регуляторов, обеспечивающих требуемое качество переход-

ного процесса. Так, в работах [12–14] представлен порядок формирования типовых нечетких регуляторов, основанных на нечеткой логике. Принципы синтеза нейросетевых регуляторов, использующих искусственные нейронные сети (ИНС), изложены в научных статьях [15, 16].

Ранее автором был рассмотрен алгоритм настройки нечеткого регулятора для улучшения качества переходного процесса в системе стабилизации угла тангажа низколетящего аппарата [17]. В текущем же исследовании для решения аналогичной задачи в системе стабилизации высоты полета применен нейросетевой регулятор, настройка которого, как и предыдущего, была произведена в среде программного комплекса Matlab Simulink. Таким образом, постановка исследовательской задачи имеет следующий вид: требуется осуществить настройку оптимального нейросетевого регулятора по критерию максимизации качества переходного процесса системы стабилизации высоты экраноплана с целью улучшить совокупный показатель управляемости рассматриваемого объекта.

Краткие теоретические сведения

Под стабилизацией понимается вычисление разницы между заданным (требуемым) значением измеряемого летного параметра (в данном случае высоты) и фактически измеренным значением на выходе системы, передаваемым по обратной связи к началу системы для расчета разницы. Система управления по высоте h формируется исходя из сигналов измерения высоты: в настоящем исследовании измерение h и \dot{h} осуществляется набором из нескольких локационных высотомеров и акселерометров вертикальной оси чувствительности, а также одним доплеровским измерителем вертикальной скорости [18]. В системе стабилизации используются сигналы с коэффициентами: а) сигнал высоты с K_h ; б) сигнал вертикальной скорости с $K_{\dot{h}}$; в) сигнал угла тангажа с K_θ ; г) сигнал угловой скорости тангажа с $K_{\dot{\theta}}$. Последние два сигнала необходимы в контурах обратной связи для компенсации движения центра масс и угловых движений соответственно.

Математическая модель отклонения рулей высоты на угол δ_B , представляющая собой закон управления системы автоматической стабилизации по высоте полета экраноплана, выглядит следующим образом [19]:

$$\delta_B = (K_h + K_{\dot{h}} \cdot p) \cdot h + (K_\theta + K_{\dot{\theta}} \cdot p) \cdot \theta - K_h \cdot h_3, \quad (1)$$

где h_3 — заданное на входе (требуемое) значение текущей высоты полета h .

В предположении о малой скорости движения центра масс, позволяющей пренебречь динамическими погрешностями элементов системы, закон (1) можно представить в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \Delta(p) \cdot \theta = (b_0 \cdot p + a_4) p \cdot h_3 + F_1; \\ \Delta(p) \cdot h = a_4 \cdot h_3 + F_2, \end{cases} \quad (2)$$

где $\Delta(p) = p^4 + a_1 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p$; $b_0 = n_B \cdot K_h$, $a_4 = n_B \cdot n_{22} \cdot K_h$ — системные коэффициенты n_B и n_{22} , вычисляемые по Боднеру; F_1 и F_2 — внешние возмущения, действующие на систему.

Выражение для расчета передаточной функции всей системы стабилизации по управляющему сигналу имеет вид

$$W(p) = \frac{a_4}{p^4 + a_1 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p}, \quad (3)$$

где $a_1 = c_1 + n_B \cdot K_{\dot{\theta}}$; $a_2 = c_2 + n_B \cdot (K_\theta + n_{22} \cdot K_{\dot{\theta}})$; $a_3 = n_B \cdot n_{22} \cdot (K_\theta + K_{\dot{h}})$; c_1 и c_2 — системные боднеровские коэффициенты.

Система уравнений для расчета коэффициентов усиления системы выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} K_h = \frac{\omega^4}{n_B \cdot n_{22}}; \\ K_\theta = \frac{1}{n_B} (A_2 \cdot \omega^2 - c_2 + c_1 \cdot n_{22} - A_1 \cdot \omega \cdot n_{22}); \\ K_{\dot{h}} = \frac{1}{n_B \cdot n_{22}} \cdot [A_3 \cdot \omega^3 - A_2 \cdot \omega^2 \cdot n_{22} + \\ + A_1 \cdot \omega \cdot n_{22}^2 + n_{22} \cdot (c_2 - c_1 \cdot n_{22})]; \\ K_{\dot{\theta}} = \frac{1}{n_B} \cdot (A_1 \cdot \omega - c_1), \end{cases} \quad (4)$$

где $a_1 = A_1 \cdot \omega$; $a_2 = A_2 \cdot \omega^2$; $a_3 = A_3 \cdot \omega^3$, A_i и ω — некоторые заданные величины.

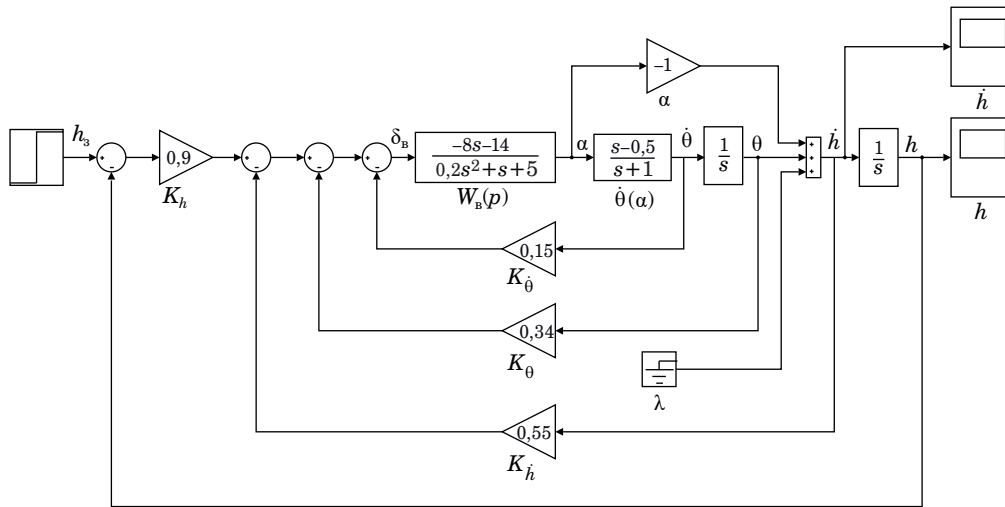
Классическая и модернизированная нейросетевым регулятором системы стабилизации высоты полета

Структурная Simulink-схема системы стабилизации по высоте (рис. 1) составлена на основе описанной выше математической модели.

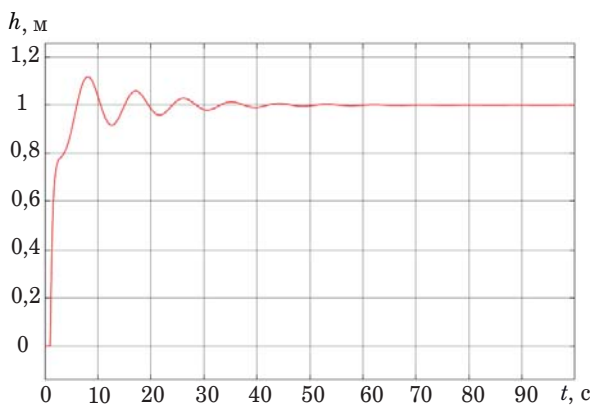
В качестве объекта управления рассмотрен экраноплан тяжелого класса с параметрами [20]: масса — 700–800 т, размах крыла — 40 м при средней (крейсерской) высоте полета 6 м и минимально допустимой высоте полета 4 м, максимальная высота действия экранного эффекта — 40 м, аэродинамическая схема аппарата — «составное крыло». Линеаризация системы была произведена по принципу, аналогичному рассмотренному в статье [17]. В представленной схеме отражено возмущающее воздействие на систему, связанное с углом атаки α . Влияние внешней помехи λ не учитывается: в данном случае модель помехи — нулевой сигнал (Ground). На выходе системы имеется измеренное (фактическое) значение высоты h , дающее системное рассогласование $\Delta h = h_3 - h$. Следует заметить, что линеаризованные коэффициенты передаточной функции экраноплана как объекта управления отражают случай, когда отсчет изменения высоты Δh производится с $h_{cp} = 6$ м — крейсерской высоты полета, что соответствует работе системы стабилизации в неволезирующем режиме движения судна (в пределах действия экранного эффекта).

Переходный процесс системы стабилизации высоты представлен на рис. 2. Зависимость наглядно показывает всю трудность процесса стабилизации данного типа летательного аппарата по высоте полета: общее время переходного процесса составило $t_{\text{п}} \approx 80$ с с учетом характера его затухающих колебаний, значение статической ошибки пренебрежимо мало ($\Delta h \approx 0,04$ %).

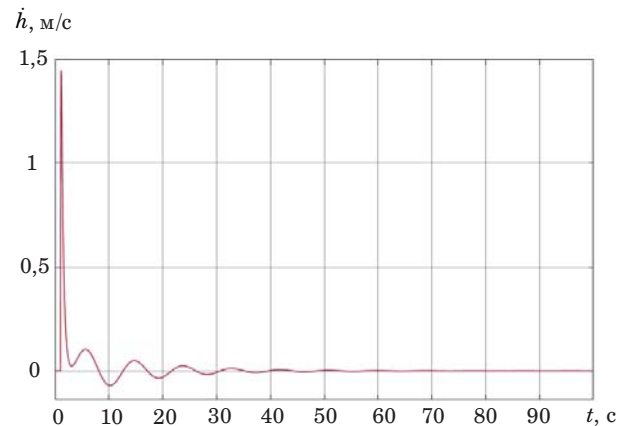
Несмотря на то, что система стабилизации по высоте h устойчива, очевидно [21], что качество



■ **Рис. 1.** Схема системы автоматической стабилизации высоты полета
 ■ **Fig. 1.** Scheme of the automatic altitude stabilization system



■ **Рис. 2.** Переходный процесс системы стабилизации высоты полета экраноплана
 ■ **Fig. 2.** The transient of the WIG-craft altitude stabilization system



■ **Рис. 3.** Процесс установления в нуле вертикальной скорости изменения высоты полета
 ■ **Fig. 3.** The process of setting the vertical speed of altitude change to zero

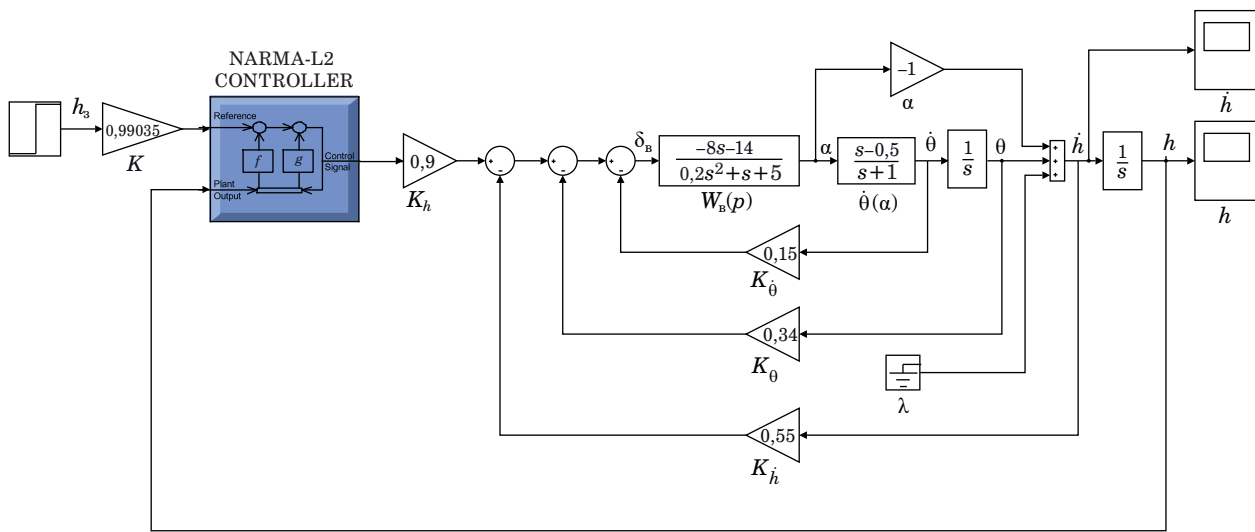
переходного процесса не удовлетворяет требованиям по быстродействию, предъявляемым к системам управления по каналам основных параметров полета экраноплана. В частности, столь длительное время стабилизации и колебательность данного процесса недопустимы в условиях полета вблизи подстилающей поверхности в пределах действия экранного эффекта.

Также неудовлетворительно качество работы системы по каналу вертикальной скорости изменения высоты \dot{h} : ее сведение к нулю достигается за недопустимо большой интервал времени, при этом на отметке времени $t = 2$ с имеется значительный выброс $\dot{h} \approx 1,45$ м/с (рис. 3).

Предлагается улучшить процесс стабилизации высоты полета экраноплана при помощи

ее интеллектуализации с нейросетевым регулятором NARMA-L2 Controller (Nonlinear Auto-Regressive Moving Average), использующим авторегрессионную модель объекта управления со скользящим средним [22]. Данный тип регулятора был выбран по причине наименьших затрат вычислительных ресурсов по сравнению с нейросетевым регулятором, использующим эталонную модель объекта (Model Reference Controller), и предиктивным (предсказательным, NN Predictive Controller).

Вид модернизированной нейросетевым регулятором интеллектуальной системы стабилизации показан на рис. 4. Следует заметить, что совместно с регулятором используется усилительное устройство с коэффициентом $K = 0,99035$ для конечной компенсации статической ошибки



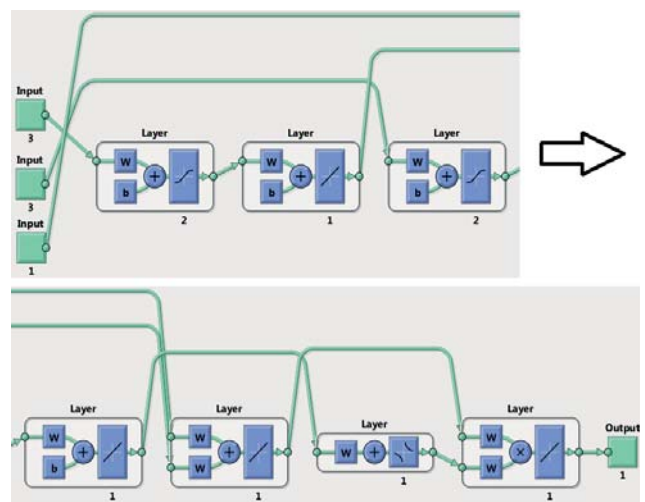
■ **Рис. 4.** Схема системы стабилизации высоты полета экраноплана с нейросетевым регулятором
 ■ **Fig. 4.** Scheme of the altitude stabilization system with the neurocontroller

регулирования, возникающей при использованной модели ИНС. Корректировка остальных элементов системы при этом не требуется.

Параметрический синтез нейросетевого регулятора

Применительно к нейросетевым регуляторам в системе автоматического управления (САУ) используется ИНС прямого распространения, содержащая семь слоев: функция активации входного слоя – гиперболический тангенс, последнего слоя – линейная. Классический метод обучения – по Левенбергу – Марквардту (обратное распространение ошибки). Один из вариантов такой сети для случая трех входных и одного выходного нейронов, а также четырех нейронов скрытого слоя представлен на рис. 5. Требуемое качество переходного процесса САУ, в которой используется нейросетевой регулятор, достигается оптимальной конфигурацией встраиваемой в него ИНС и ее обучением методом Левенберга – Марквардта. Настройка осуществляется заданием числовых значений в окне настройки нейросетевого регулятора (рис. 6).

Также перед обучением ИНС регулятора необходимо сформировать обучающую выборку значений входного сигнала: в большинстве случаев обучающая выборка генерируется случайным образом по причине априорной неопределенности, а следствием стохастичности данного процесса является изменение поведения всей САУ при задании другой обучающей выборки. С другой стороны, нейросетевой регулятор обладает важным свойством адаптивности, что

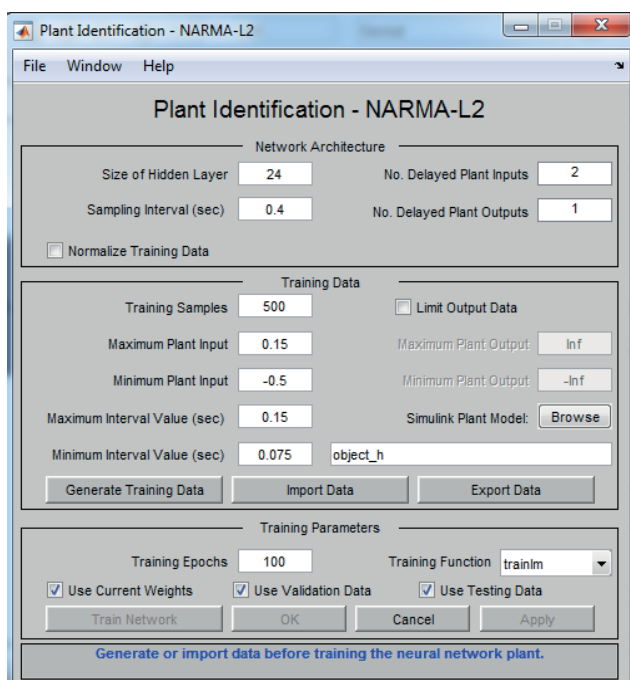


■ **Рис. 5.** Имитационная модель искусственной нейронной сети в нейросетевом регуляторе системы управления
 ■ **Fig. 5.** Simulation model of the artificial neural network in neurocontroller of the control system

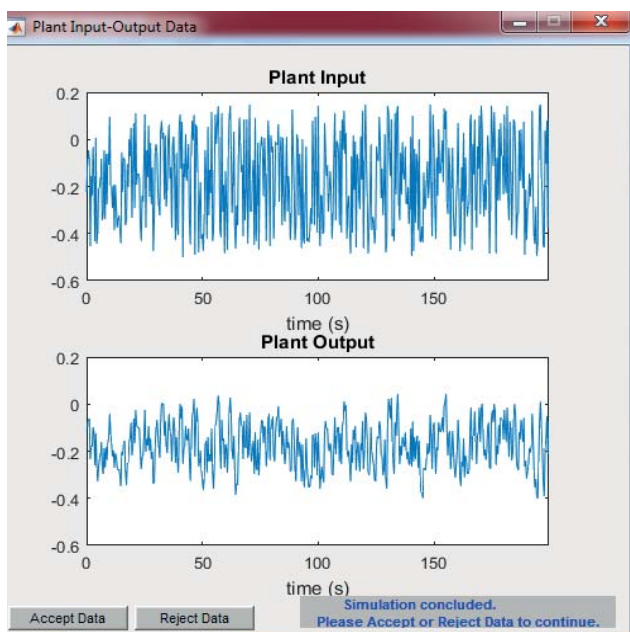
исключает необходимость вручную перенастраивать регулятор при изменении входных данных САУ.

Представленные в окне настройки регулятора параметры формируют целевое качество переходного процесса всей системы стабилизации:

- Size of Hidden Layer (количество нейронов скрытого слоя);
- Sampling Interval (интервал времени сбора данных из модели объекта, с);
- No. Delayed Plant Inputs (число элементов запаздывания на входе модели объекта);



■ **Рис. 6.** Окно настройки нейросетевого регулятора
 ■ **Fig. 6.** The window with settings of neurocontroller



■ **Рис. 7.** Обучающая выборка для нейронной сети регулятора
 ■ **Fig. 7.** Training data for the neural network in controller

- No. Delayed Plant Outputs (число элементов запаздывания на выходе модели объекта);
- Normalize Training Data (приведение обучающей выборки к нормированному диапазону значений [0; 1]);

- Training Samples (количество обучающих примеров в выборке для обучения, тестирования и контроля нейронной сети);
- Minimum Plant Input (минимально допустимое значение входного сигнала объекта);
- Maximum Plant Input (максимально допустимое значение входного сигнала объекта);
- Minimum Plant Output (минимально допустимое значение выходного сигнала объекта);
- Maximum Plant Output (максимально допустимое значение выходного сигнала объекта);
- Minimum Interval Value (минимальный интервал входного сигнала объекта, с);
- Maximum Interval Value (максимальный интервал входного сигнала объекта, с);
- Training epochs (максимально допустимое число итераций обучения);
- Training Function (обучающая функция, задана как trainlm по умолчанию).

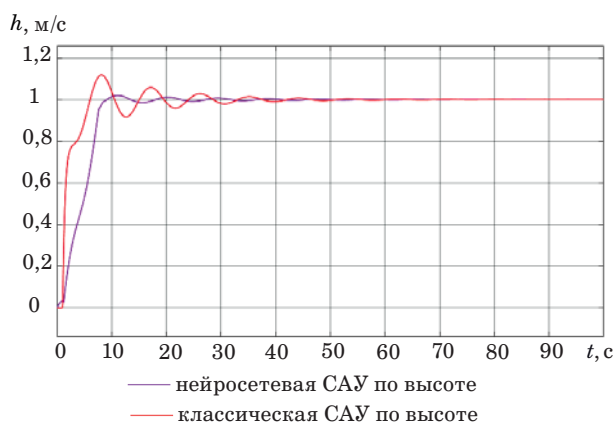
В качестве объекта управления (Simulink Plant Model) использована схема оригинальной системы стабилизации (см. рис. 1), сохраненная в отдельный файл “object_h”; данный шаг необходим для реализации свойства адаптивности регулятора. Обучающая выборка, сгенерированная для нейронной сети посредством Generate Training Data, представлена на рис. 7. Характер изменения выходного (Output) сигнала относительно входного (Input) объекта управления говорит о правильности формирования выборки. После обучения нейронной сети регулятор настроен и готов к использованию.

Сравнительный анализ классической и нейросетевой систем стабилизации высоты полета экраноплана

Полученные результаты позволяют провести дальнейший сравнительный анализ рассмотренных систем. Для этого необходимо осуществить параллельное соединение классической (см. рис. 1) и нейросетевой (см. рис. 4) систем стабилизации высоты экраноплана. Как отмечалось ранее, преобразующее звено $K = 0,99035$ используется совместно с нейросетевым регулятором для компенсации статической ошибки конечного переходного процесса нейросетевой системы стабилизации. Структурные Simulink-схемы самой системы, определенной на рис. 1, отнесены в отдельные блоки типа Subsystem для упрощения представления параллельно соединенных систем.

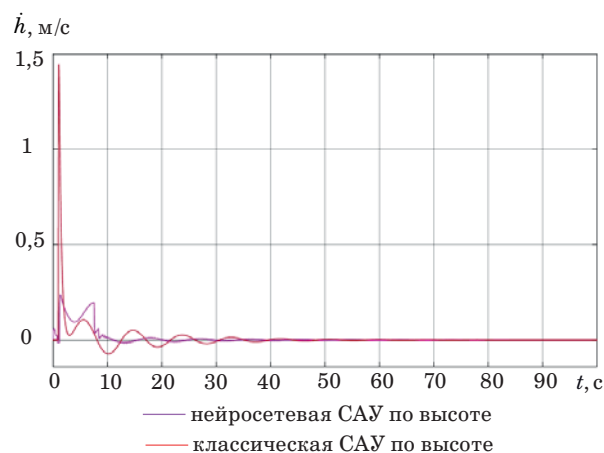
Переходные процессы двух систем стабилизации представлены на одной координатной плоскости (рис. 8).

После преобразования схемы параллельного соединения классической и нейросетевой систем



■ **Рис. 8.** Переходные процессы классической и нейросетевой систем стабилизации высоты полета экраноплана

■ **Fig. 8.** Transients of classic and neuro WIG-craft altitude stabilization systems



■ **Рис. 9.** Процессы стабилизации вертикальной скорости изменения высоты

■ **Fig. 9.** The processes of the vertical speed of altitude change stabilization

были также получены процессы стабилизации обеих систем по каналу вертикальной скорости \dot{h} (рис. 9).

Заключение

По результатам исследования можно сделать качественное заключение о целесообразности применения нейросетевого регулятора для стабилизации по высоте полета экраноплана. Нейросетевая интеллектуализация позволила уменьшить время переходного процесса на 31 % ($t_{\text{classic}} \approx 80$ с, $t_{\text{neuro}} \approx 55$ с), а также снизить его колебательность. Кроме того, увеличилась плавность

процесса стабилизации вертикальной скорости изменения высоты полета при незначительном увеличении флуктуационных составляющих. Данный фактор можно объяснить тем, что генерация обучающей выборки для нейронной сети регулятора осуществляется случайным образом, т. е. обучающая выборка является стохастическим процессом. Поэтому при формировании другой обучающей выборки характер конечного переходного процесса может измениться, с другой стороны, свойство адаптивности нейросетевого регулятора позволяет ему учитывать изменение входных данных без потери устойчивости всей системы стабилизации.

Литература

1. **Княжский А. Ю.** Разработка и исследование алгоритма управления движением низколетящего аппарата над неровной поверхностью, минимизирующего его среднюю высоту: дис. ... канд. техн. наук. СПб., СПбГУТ им. проф. Бонч-Бруевича, 2018. 135 с.
2. **Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А.** Минимизация абсолютной высоты низколетящего аппарата за счет вертикального огибания длиннопериодических морских волн. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2020, т. 63, № 1, с. 84–93. doi:10.17586/0021-3454-2020-63-1-84-93
3. **Куликов В. Е., Морозов П. А.** Анализ точности стабилизации геометрической высоты маловысотного полета летательного аппарата над рельефом местности. *Навигация и управление летательными аппаратами*, 2022, № 2(37), с. 70–84. EDN: VXWHMC
4. **Бондарев В. Г., Лопаткин Д. В., Шобонов М. С.** Разработка алгоритмического обеспечения системы стабилизации высоты беспилотного летательного аппарата. *Информатика: проблемы, методы, технологии: материалы XXI Междунар. науч.-метод. конф.*, Воронеж, 2021, с. 205–210. EDN: YBANKB
5. **Бронников А. М., Каравашкина Е. О., Кулабухов В. С., Чекин А. Ю.** Синтез управления в продольном канале маловысотного контура беспилотного вертолета. *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*, 2015, № 213(3), с. 5–12. EDN: TONRSN
6. **Небылов А. В., Небылов В. А., Панферов А. И.** Концепция морской горизонтальной посадки крылевого космического аппарата путем стыковки с экранопланом. *Инновационное приборостроение*, 2022, т. 1, № 1, с. 65–81. EDN: HNMEME
7. **Княжский А. Ю., Небылов А. В., Небылов В. А.** Анализ точности измерения высоты низколетяще-

- го аппарата в условиях морского волнения. *Авиакосмическое приборостроение*, 2018, № 10, с. 3–10. EDN: YMHLSP
8. **Nebylov A. V., Nebylov V. A.** WIG-craft flight control concept for the waved sea. *EUCASS 2017: Electronic Resource*, Milan, Italy, 03–06 June 2017, 2017. EDN: ZMKWJB. <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-202.pdf> (дата обращения: 30.09.2024).
 9. **Королев А. П.** Генетический алгоритм для автоматической настройки ПИД-регулятора. *Молодой ученый*, 2023, № 17(464), с. 1–7. EDN: PVJAMF
 10. **Mewada S.** Perspectives of fuzzy logic and their applications. *International Journal of Data Analytics (IJDA)*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 99–145. doi:10.4018/IJDA.2021010105
 11. **Иванов М. Е.** Применение искусственной нейронной сети для распознавания радиосигналов приемниками летательного аппарата. *Информационно-измерительные и управляющие системы*, 2023, т. 21, № 4, с. 19–24. EDN: DWTDEA
 12. **Богачев И. С., Коломыцев И. С.** Методика настройки нечеткого регулятора с нелинейной характеристикой Р-типа средствами Matlab. *Современные наукоемкие технологии*, 2020, № 11–1, с. 9–14. doi:10.17513/snt.38330, EDN: VGDEWH
 13. **Бураков М. В., Коновалов А. С.** Синтез нечетких логических регуляторов. *Информационно-управляющие системы*, 2011, № 1, с. 22–27.
 14. **Андривская Н. В., Билоус О. А., Семенов С. В.** Методика проектирования нечеткого регулятора на базе ПИ-регулятора в среде MATLAB. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*, 2012, № 6, с. 282–287. EDN: PWNZBX
 15. **Шилонос А. В., Молдован Д. В.** Динамическая коррекция управляющих воздействий системы управления сложного технического объекта с использованием нейросетевых технологий. *Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии*, 2021, № 4 (4), с. 415–422. EDN: SYZWSB
 16. **Величко Е. П., Соколыч П. Ю.** Применение нейросетевого регулятора в системах позиционного регулирования. *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*, 2015, № 2, с. 7–20. EDN: TVSBZZ
 17. **Иванов М. Е., Езерский В. В.** Применение нечеткого регулятора для устранения флуктуаций переходного процесса возмущенной системы автоматического управления углом тангажа летательного аппарата. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 3, с. 51–58. doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58, EDN: DACXFO
 18. **Иванов М. Е., Езерский В. В.** Метод оптимизации параметров измерителя путевой скорости низколетящего летательного аппарата на основе применения теории оптимальной фильтрации. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2023, т. 22, № 4, с. 78–85. doi:10.18287/2541-7533-2023-22-4-78-85, EDN: ANJPFJ
 19. **Кравченко П. П., Куликов Л. И., Щербинин В. В.** Применение метода оптимизированных дельта-преобразований в задаче управления посадкой беспилотного летательного аппарата. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2019, № 5, с. 130–144. doi:10.1134/S0002338819050093, EDN: XCPHAZ
 20. **Иванов М. Е., Езерский В. В.** Применение методов искусственного интеллекта в системе управления воздушным движением тяжелого многоцелевого экраноплана. *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: материалы XXIV Междунар. науч. конф.: в 3 ч., Санкт-Петербург, 31 мая–04 июня 2021 г. СПб., СПбГУАП, 2021, ч. 2, с. 323–330. EDN: GXGBAX*
 21. **Вшивков Ю. Ф., Галушко Е. А., Кривель С. М.** Синтез эффективной автоматической системы управления экранопланов. *Решетневские чтения*, 2013, т. 1, № 17, с. 8–9. EDN: SJCHGH
 22. **Al-Falooji N. S., Abbod M.** Helicopter control using fuzzy logic and Narma-L2 techniques. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2020, vol. 12, no. 5, pp. 1–14. doi:10.5815/ijisa.2020.05.01, EDN: VNDRBI

UDC 62-503.55

doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34

EDN: BOBWBW

Neuro-controller for improving the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization systemM. E. Ivanov^a, Assistant Professor, orcid.org/0000-0002-7584-6946Yu. F. Matasov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0009-0003-2435-8365, yfmatasov@yandex.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The stabilization of the flight altitude of WIG-craft is one of the most relevant problems of controlling this type of aircraft. The relevance consists in the difficulty of organizing this process with the required level of quality due to the goal setting of flight safety near the underflying surface. **Purpose:** To transform the WIG-craft altitude stabilization system and develop the neuro-controller

for it, which will improve the quality of the system's transient process; to conduct the simulation of the original and upgraded stabilization systems. **Results:** Using Matlab Simulink we carry out the simulation of the work of classic and neural flight altitude stabilization systems. As a result of the simulation we improve the quality of the transient process of the system by reducing its variability and ending. To do this, we add the NARMA-L2 Controller to the control system using one of the methods of artificial intelligence – an artificial neural network. The controller is set up using the Levenberg – Marquardt method of training this network after setting the necessary parameters of the neural network structure and forming a training data. **Practical relevance:** The optimal setting of the neuro-controller makes it possible to improve the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization system, with a long time required to achieve a steady state of operation being its typical feature.

Keywords – stabilization system, artificial intelligence methods, neuro-controller, the Levenberg – Marquardt method, transient process.

For citation: Ivanov M. E., Matasov Yu. F. Neuro-controller for improving the quality of the transient process of the WIG-craft altitude stabilization system. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2024, no. 6, pp. 27–34 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2024-6-27-34, EDN: BOBWBN

References

1. Knyazhskij A. Yu. *Razrabotka i issledovanie algoritma upravleniya dvizheniem nizkoletyashhego apparata nad nerovnoj poverkhnost'yu, minimiziruyushhego ego srednyuyu vysotu*. Dis. kand. tech. nauk [Development and research of an algorithm for controlling the movement of a low-flying vehicle over an uneven surface, minimizing its average height. cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, SPbGUT im. prof. Bonch-Bruевича Publ., 2018. 135 p. (In Russian).
2. Knyazhskiy A. Yu., Nebylov A. V., Nebylov V. A. Minimizing the absolute height of a lowflying vehicle due to vertical tracking of long-period sea waves. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 84–93 (In Russian). doi:10.17586/0021-3454-2020-63-1-84-93
3. Kulikov V. E., Morozov P. A. Analysis of geometric low-level flight altitude stabilization during flight over terrain. *Aircraft Navigation and Control*, 2022, no. 2(37), pp. 70–84 (In Russian). EDN: VXWHMC
4. Bondarev V. G., Lopatkin D. V., Shobonov M. S. Development of algorithmic support for the altitude stabilization system the unmanned aircraft. *Materialy XXI Mezhduнародной nauchno-metodicheskoy konferencii "Informatika: problemy, metody, tekhnologii"* [Proc. of the XXI Intern. Scientific and Methodological Conf. "Computer science: problems, methods, technologies"]. Voronezh, 2021, pp. 205–210 (In Russian). EDN: YBANKB
5. Bronnikov A. M., Karavashkina E. O., Kulabukhov V. S., Chekin A. Yu. Design of the low-level control system in longitudinal channel of an unmanned helicopter. *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 213(3), pp. 5–12 (In Russian). EDN: TONRSN
6. Nebylov A. V., Nebylov V. A., Panferov A. I. The concept of winged space vehicle marine horizontal landing by docking with ekranoplane. *Innovative Instrumentation*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 65–81 (In Russian). EDN: HHMEME
7. Knyazhsky A. Y., Nebylov A. V., Nebylov V. A. Analysis of the accuracy of a system for measuring the altitude of a low-altitude vehicle near sea waves. *Aerospace Instrumentation*, 2018, no. 10, pp. 3–10 (In Russian). EDN: YMHLSL
8. Nebylov A. V., Nebylov V. A. WIG-craft flight control concept for the waded sea. *EUCASS 2017: Electronic Resource*, Milan, Italy, June 03–06 2017, 2017. EDN: ZMKWJB. Available at: <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-202.pdf> (accessed 30 September 2024).
9. Korolev A. P. Genetic algorithm for automatic PID controller tuning. *Young Scientist*, 2023, no. 17(464), pp. 1–7. EDN: PVJAMF
10. Mewada S. Perspectives of fuzzy logic and their applications. *International Journal of Data Analytics (IJDA)*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 99–145. doi:10.4018/IJDA.2021010105
11. Ivanov M. E. Application of an artificial neural network for recognition of radio signals by aircraft receivers. *Information-Measuring and Control Systems*, 2023, vol. 21, no. 4, pp. 19–24 (In Russian). doi:10.18127/j20700814-202304-03, EDN: DWTDEA
12. Bogachev I. S., Kolomytsev V. G. Technique for adjusting a fuzzy regulator with a nonlinear P-type characteristic by Matlab. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2020, no. 11-1, pp. 9–14. doi:10.17513/snt.38330, EDN: VGDEWH
13. Burakov M. V., Konovalov A. S. Fuzzy controllers design. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 1, pp. 22–27 (In Russian).
14. Andrievskaya N. V., Bilous O. A., Semenov S. V. *Metodika proektirovaniya nechetkogo regulyatora na baze PI-regulyatora v srede MATLAB*. In: *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [The methodology of designing a fuzzy controller based on a PI-controller in the Matlab environment. In: Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electro-technics, Informational Technologies, Control Systems], 2012, no. 6, pp. 282–287 (In Russian). EDN: PWNZBX
15. Shilonosov A. V., Moldovan D. V. Dynamic correction of control actions of the control system of a complex technical object using neural network technologies. *Al'manah Permskogo voennogo instituta vojsk nacional'noj gvardii* [Almanac of the Perm Military Institute of the National Guard], 2021, no. 4, pp. 415–422 (In Russian). EDN: SYZWBS
16. Velichko E. P., Sokolchik P. Yu. Neural network controllers in the system position control. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology], 2015, no. 2, pp. 7–20 (In Russian). EDN: TVSBZZ
17. Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. The use of the intelligent fuzzy controller for the elimination of fluctuations in the transient process of the perturbed automatic pitch angle control system of an aircraft. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 3, pp. 51–58 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-3-51-58, EDN: DACXFO
18. Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. Optimization of the parameters of a ground speed meter of low-flying aircraft based on the application of the theory of optimal filtration. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2023, vol. 22, no. 4, pp. 78–85 (In Russian). doi:10.18287/2541-7533-2023-22-4-78-85, EDN: ANJPFJ
19. Kravchenko P. P., Kulikov L. I., Scherbinin V. V. Application of the method of optimized delta-transformations in the control landing problem for an unmanned aerial vehicle. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, vol. 58, no. 5, pp. 786–800. doi:10.1134/S1064230719050095, EDN: VAOHXJ
20. Ivanov M. E., Yezerskiy V. V. Application of artificial intelligence methods in the air traffic control system of a heavy multipurpose WIG-craft. *Materialy XXIV Mezhduнародной nauchnoj konferencii "Volnovaya elektronika i infokommunikacionnye sistemy"* [Proc. of the XXIV Intern. Scientific Conf. "Wave electronics and infocommunication systems"]. Saint-Petersburg, 2021, part 2, pp. 323–330. EDN: GXGBAX
21. Vshivkov J. F., Galushko E. A., Krivel S. M. Synthesis of efficient automatic WIG control system. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2013, vol. 1, no. 17, pp. 8–9 (In Russian). EDN: SJCHGH
22. Al-Falooji N. S., Abbod M. Helicopter control using fuzzy logic and Narma-L2 techniques. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2020, vol. 12, no. 5, pp. 1–14. doi:10.5815/ijisa.2020.05.01, EDN: VNDRBI