



УДК 621.318  
ГРНТИ 90.27.34

## МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОБРАБОТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

*И.М. ГОЛЕВ, доктор физико-математических наук, профессор  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Р.Б. УГРЮМОВ, кандидат физико-математических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Т.И. ЗАЕНЦЕВА, кандидат физико-математических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
А.В. МАНДРЫКИН  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье описана магнитометрическая система локальной навигации с нейросетевой обработкой информации. Задача вычисления линейных и угловых координат подвижного объекта решается с помощью искусственной нейросети, которая реализована в MATLAB. Для обучения нейросети использовался алгоритм «с учителем»: шесть сигналов с трехкоординатного магнитометрического датчика подавались на входы сети, затем выходной сигнал сети, который сравнивался с соответствующими значениями эталонного подмножества данных. Эталонные данные формировались с помощью кинематического механизма с использованием шаговых двигателей и сервоприводов. Представлены результаты эксперимента по проверке работоспособности описанной системы, в котором моделировалась посадка макета самолета по глиссаде и измерялись высота макета над взлетно-посадочной полосой, расстояние до магнитного маяка и крен макета самолета. Погрешность результатов измерений не превышает 4 % и объясняется погрешностью работы кинематической схемы установки.

*Ключевые слова:* магнитометрическая система локальной навигации, искусственная нейронная сеть, оцифровка сигнала, обучение нейросети.

## LOCAL NAVIGATION MAGNETOMETRIC SYSTEM WITH NEURAL NETWORK INFORMATION PROCESSING

*I.M. GOLEV, Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
R.B. UGRYUMOV, Candidate of Physical and Mathematical sciences  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
T.I. ZAENTSEVA, Candidate of Physical and Mathematical sciences  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
A.V. MANDRYKIN  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article describes a local navigation magnetometric system with neural network information processing. The problem of calculating the linear and angular coordinates of a moving object is solved using an artificial neural network, which is presented in the MATLAB package. To train the neural network the «with a teacher» algorithm was used: six signals from a three-coordinate magnetometric sensor were fed to the network inputs, then the network output signal, which was compared with the corresponding values of the data reference subset. The reference data was generated using a kinematic mechanism using stepper motors and servos. The results of an experiment to test the performance of the described system are presented, in which the landing of a model aircraft on a glide path was



simulated and the height of the model above the runway, the distance to the magnetic beacon and the roll of the model aircraft were measured. The error of the measurement results does not exceed 4 % and is explained by the installation kinematic scheme error.

*Keywords:* local navigation magnetometric system, artificial neural network, signal digitization, neural network training.

**Введение.** Развитие беспилотных аппаратов и транспортных средств в настоящее время является технико-технологическим базисом разработки новейших систем гражданского и военного назначения. Эффективность их функционирования во многом определяется системами навигации и позиционирования. Широкое применение в этих системах находят глобальные навигационные системы (ГНС), которые имеют ряд явных преимуществ: возможность круглосуточно определять координаты объектов в любой точке земного шара и околоземного пространства, слабая зависимость точности от погодных условий (дождя, снега, высокой или низкой температуры) [1]. Вместе с тем, подобные глобальные системы имеют ряд критических уязвимостей, например:

невозможность решать навигационные задачи в лесистых и горных местностях, в условиях городской застройки, внутри зданий;

аварии на спутниках;

низкая помехоустойчивость, например, использование генератора имитационных помех мощностью 2 Вт может нарушить работу ГНС в радиусе 150 км [2].

В сложившейся ситуации решением данной проблемы является:

совершенствование штатных систем навигации;

создание локальных систем навигации, которые совместно со штатными способны решать навигационные задачи в условиях активных помех.

Ниже рассматривается магнитометрическая система локальной навигации, обладающая высокой помехозащищенностью.

**Актуальность.** Использование переменного магнитного поля в качестве навигационного позволяет создавать навигационные системы, характеристики которых практически не зависят от климатических факторов и метеоусловий, преднамеренных электромагнитных помех, наличия искусственных и естественных преград с малой электрической проводимостью [3–5].

Принцип действия таких систем заключается в следующем: в области расположения подвижного объекта создается навигационное поле – переменное магнитное поле с известными в каждой точке пространства параметрами. Измеряя эти параметры магнитометрическими датчиками, расположенными на подвижном объекте, можно вычислить координаты объекта. Математический расчет координат подвижного объекта – достаточно сложная задача. Кроме того, возникают ошибки, связанные с отличием реального источника магнитного поля от его математической модели [6].

В работе предлагается использовать нейросетевую обработку информации с магнитометрических датчиков для вычисления координат объекта.

**Вычисление координат объекта.** Источником навигационного магнитного поля может служить вращающийся магнитный диполь. Технически его можно реализовать, расположив две рамки с током (катушки индуктивности) под углом 90° и пропустив по ним токи  $I \cos(\omega t)$  и  $I \sin(\omega t)$  (рисунок 1).

На рисунке 1 и 2 взаимно перпендикулярные рамки с токами  $I \cos(\omega t)$  и  $I \sin(\omega t)$  соответственно. При этом вектор магнитного момента  $\vec{M}$  вращается в плоскости  $xOz$  с частотой  $\omega$ , а индукция магнитного поля определяется соотношением:

$$\vec{B}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3(\vec{M}, \vec{r}) \cdot \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{M}}{r^3} \right). \quad (1)$$



Здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная, вектор  $\vec{M}$  – магнитный момента магнитного диполя,  $\vec{r}$  – радиус-вектор точки наблюдения.

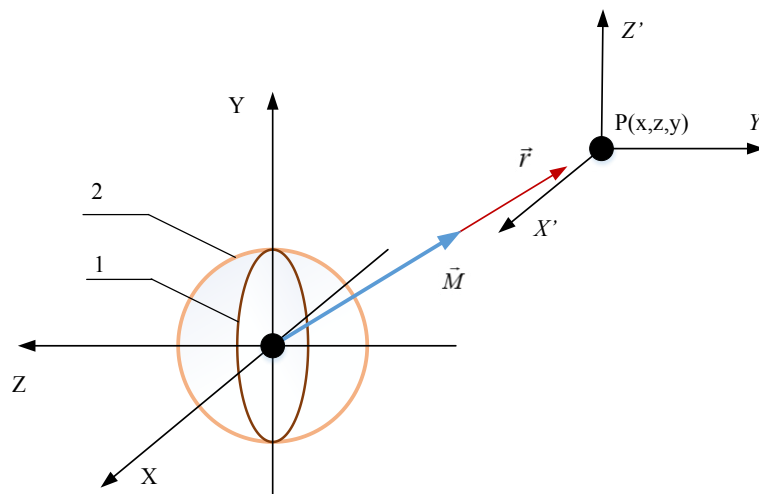


Рисунок 1 – Схематическое изображение вращающегося магнитного диполя

На подвижном объекте, находящемся в точке  $P(x,y,z)$ , располагается трехкоординатный магнитометрический датчик, измеряющий индукцию магнитного поля  $\vec{B}$ . Проекции вектора  $\vec{B}$  на оси чувствительности датчика меняются по гармоническому закону:

$$\begin{cases} B'_x(t) = B'_{0x} \cos(\omega t - \phi'_{0x}) \\ B'_y(t) = B'_{0y} \cos(\omega t - \phi'_{0y}) \\ B'_z(t) = B'_{0z} \cos(\omega t - \phi'_{0z}) \end{cases} \quad (2)$$

Амплитуды  $(B'_{0x}, B'_{0y}, B'_{0z})$  и начальные фазы  $(\phi'_{0x}, \phi'_{0y}, \phi'_{0z})$  определяются расположением подвижного объекта и его поворотом относительно источника магнитного поля. Каждому набору  $(B'_{0x}, B'_{0y}, B'_{0z}, \phi'_{0x}, \phi'_{0y}, \phi'_{0z})$  соответствуют определенная точка  $P(x,y,z)$  расположения подвижного объекта и углы поворота  $(\theta, \varphi, \psi)$  этого объекта относительно источника магнитного поля [5].

Задача нахождения линейных  $(x,y,z)$  и угловых  $(\theta, \varphi, \psi)$  координат решается путем измерения набора параметров  $(B'_{0x}, B'_{0y}, B'_{0z}, \phi'_{0x}, \phi'_{0y}, \phi'_{0z})$  и обработки полученных данных с использованием нейросети.

**Нейросетевая обработка навигационной информации.** Базовый принцип действия магнитометрической локальной системы навигации изложен в работах [4–6]. Разработанный способ математической обработки измеряемых параметров и вычисления координат подвижного объекта иллюстрирует рисунок 2.

С помощью трехкоординатного датчика, например [7, 8], в точке нахождения подвижного объекта измеряются три компоненты навигационного поля  $B'_x, B'_y, B'_z$ . Сигналы оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя и микрокомпьютер 1 определяет их амплитуды  $B'_{0x}, B'_{0y}, B'_{0z}$  и фазы  $\phi'_{0x}, \phi'_{0y}, \phi'_{0z}$ . Значения поступают на вход обученной нейросети, которая ставит в соответствие этим шести параметрам координаты подвижного объекта: линейные  $x,y,z$  и угловые  $\theta, \varphi, \psi$ .

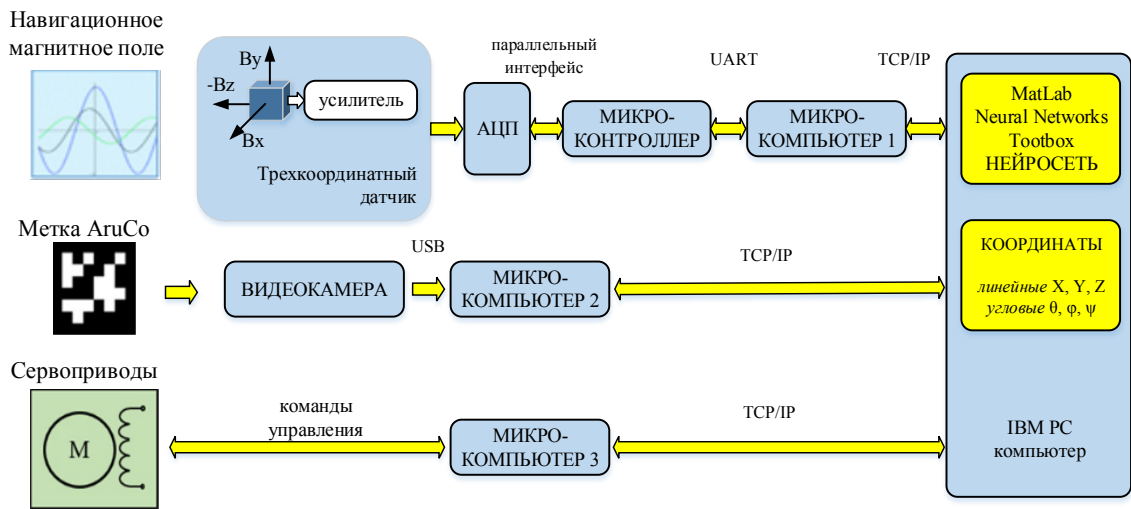


Рисунок 2 – Структурная схема бортового оборудования подвижного объекта

Измерение трех компонент магнитного поля, созданного магнитным маяком, производится с помощью трехкоординатного магнитометра, в котором применены феррозондовые датчики типа DRV425 [10]. В экспериментах использовалось переменное магнитное поле частотой 840 Гц, амплитуда которого изменялась с увеличением расстояния  $\vec{r}$  от маяка от  $10^5$  нТл до 10 нТл. С помощью инструментальных усилителей на базе ИМС IN118 с коэффициентом усиления 10,0 аналоговый сигнал с датчиков поступает на вход АЦП AD7606. Процессом оцифровки сигнала управляет программное обеспечение, работающее на микроконтроллере STM32F4, с которого производится вычисление амплитудно-фазовых характеристик аналогового сигнала: значения амплитуд  $B'_{0x}, B'_{0y}, B'_{0z}$  и фаз  $\phi'_{0x}, \phi'_{0y}, \phi'_{0z}$ . Далее по протоколу UART вычисленные значения передаются на одноплатный микрокомпьютер 1 Raspberry P3. Работающий на Raspberry P3 микросервис PointR осуществляет коммуникацию с клиентом на IBM PC по протоколу TCP/IP.

АЦП AD7606 представляет собой 16-битный, 8-канальный аналогово-цифровой обработчик данных. Аналого-цифровой преобразователь имеет на входе защиту от перенапряжения, фильтр от наложения спектральных составляющих, высокоскоростные последовательный и параллельный интерфейсы ввода-вывода.

В работе используется нейронная сеть (NN-Neural Networks пакета MATLAB, имеющая GUI (graphical User Interface – графический интерфейс пользователя) для NN-NNTool. Обучение производится путем использования метода оптимизации, реализующийся функцией TRAINLM. Функция ошибки – MSE. Используемая нейронная сеть имеет вид, изображенный на рисунке 3. Число входов  $n=6$  и выходов  $m=6$ ; число нейронов в слое 50 с активационной характеристикой типа гиперболический тангенс.

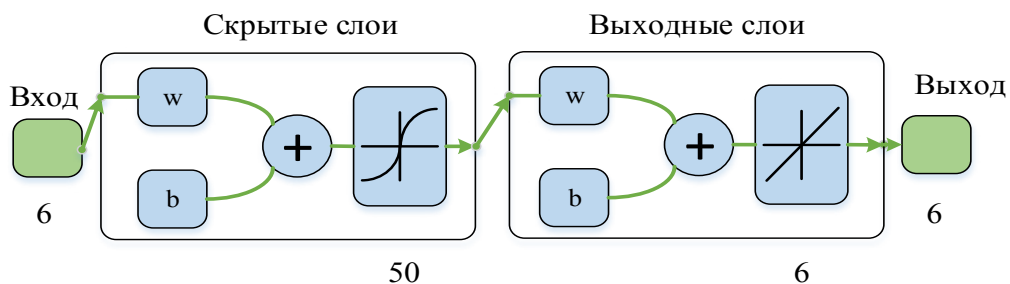


Рисунок 3 – Архитектура однослойной нейронной сети



**Особенности нейросетевой обработки информации.** Важным свойством нейросетевой обработки является способность к обобщению полученных знаний. Сеть, которая обучена с использованием некоторого подмножества  $M (M \subset L)$  эталонных данных, может производить вычисления при подаче на ее вход данных надмножества  $L$ . Данные, относящиеся к множествам  $M$  и  $L$ , должны иметь типичные элементы (рисунок 4).

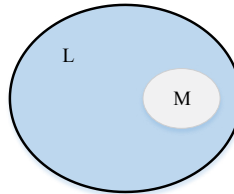


Рисунок 4 – Иллюстрация способности к обобщению полученных знаний нейросетью ( $L$  – множество значений амплитуд и фаз навигационного поля;  $M$  – подмножество значений амплитуд и фаз навигационного поля, используемое для обучения)

Это позволяет проводить обучение сети в ограниченной области навигационного пространства с последующим определением обученной нейросетью координат во всей требуемой области пространства. Второе свойство нейросетей, которое является важным в нашем случае, это аппроксимирующее свойство [11–14]. В соответствии с теоремой Вейерштрасса непрерывную функцию нескольких переменных  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  на замкнутом ограниченном множестве  $Q$  можно равномерно приблизить последовательностью полиномов. Известен ряд теорем об аппроксимации непрерывных функций многих переменных нейронными сетями с использованием практически произвольной непрерывной функции одного переменного. Важность этого свойства определяется тем, что при аналитических расчетах априори используется предположение, что источником магнитного поля является идеальный диполь, магнитное поле которого описывается формулой (1).

Также считается, что оси трехкоординатного магнитометрического датчика строго ортогональны. На практике эти условия не выполняются, что приводит к погрешностям вычисления координат, как линейных, так и угловых. Для снижения погрешностей необходимо использовать уточненные математические модели магнитного диполя и датчика, что требует дополнительных экспериментальных исследований характеристик этих устройств и существенно усложняет математические вычисления. Большой вклад в погрешности вносят и такие факторы, как нелинейности магнитометрического датчика и температурные изменения их чувствительности. Использование нейросетевой обработки сигналов позволяет нивелировать несовершенство источника магнитного поля и магнитометрических датчиков и с любой точностью вычислять произвольную непрерывную функцию  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  [11, 15].

**Обучение нейронной сети.** Процесс обучения «с учителем» представляет собой предъявление сети выборки обучающих примеров (рисунок 5). Шесть параметров магнитного поля  $(B'_{0x}, B'_{0y}, B'_{0z})$  и  $(\phi'_{0x}, \phi'_{0y}, \phi'_{0z})$  подаются на входы сети и проходят обработку внутри её структуры. Вычисляется выходной сигнал сети  $(x, y, z, \theta, \phi, \psi)$ , который сравнивается с подмножеством эталонных данных. Подмножество эталонных данных формируется следующим образом. Микросервис PositionService, работающий на одноплатном микрокомпьютере Raspberry P4 (микрокомпьютер 2, рисунок 2) снимает показания с видеокamеры и осуществляет непрерывный анализ видеопотока с использованием библиотеки OpenCV. В результате анализа видеопотока определяется положение AruCo-марки, установленной на магнитном маяке, относительно видеокamеры. Микросервис PositionService осуществляет коммуникацию с клиентом на IBM PC по протоколу TCP/IP и по запросу направляет ему актуальные координаты AruCo марки.

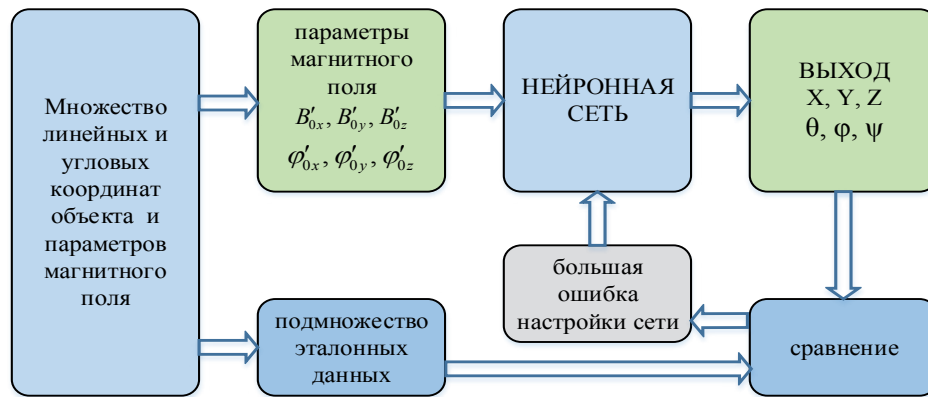


Рисунок 5 – Алгоритм обучения нейросети

Магнитный маяк может передвигаться по горизонтальным направляющим и вращаться относительно вертикальной оси при помощи шаговых двигателей и сервоприводов. Управление осуществляется программой MagneticBoard (микрокомпьютер 3, рисунок 2).

Микросервис PointRNNService, работающий на одноплатном микрокомпьютере Raspberry P3 (микрокомпьютер 1, рисунок 2), определяет положение магнитного датчика в пространстве используя нейросетевой алгоритм.

Обучение нейронной сети и экспорт программного кода обученной нейронной сети производится в программном комплексе Matlab. Для этого формируются обучающие наборы данных, которые состоят из фазово-амплитудных данных поставляемых микросервисом PointR и данных о положении видеокамеры в пространстве, поставляемых микросервисом PositionService. Поскольку положение камеры в пространстве однозначно определяет положение магнитного датчика, то по положению камеры можно рассчитать положение датчика. Для получения обучающих наборов данных управляющая программа MagneticBoard по заранее заданному сценарию позиционирует магнитный маяк и магнитный датчик в разные точки измерительного поля.

**Экспериментальная часть.** Был проведен эксперимент по проверке работоспособности описанной системы, в котором моделировалась посадка макета самолета по глиссаде  $H=f(R)$ , где  $H$  – высота макета самолета над взлетно-посадочной полосой, а  $R$  – расстояние до магнитного маяка. На рисунке 6 представлены эталонные данные, получаемые с помощью видеокамеры, (линия 1) и результаты на выходе нейросети (линия 2).

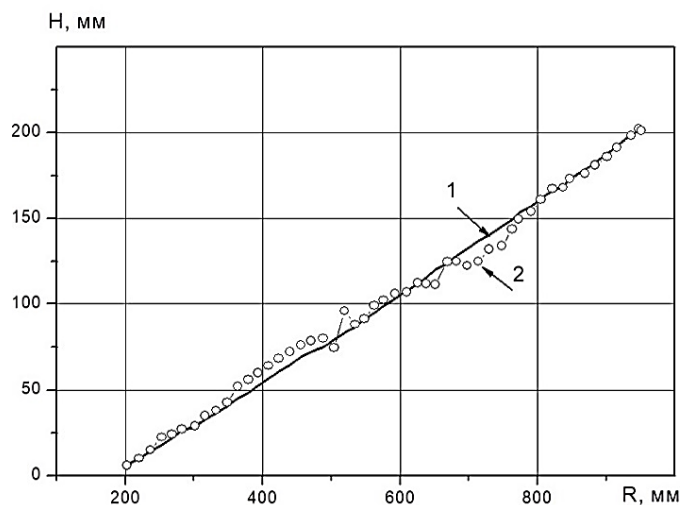


Рисунок 6 – Линии глиссады макета самолета во время эксперимента (1 – эталонные данные, 2 – результат на выходе нейросети)



Во время посадки у макета самолета периодически изменялся его поперечный угол наклона  $\varphi$  (крен) в зависимости от расстояния до маяка (рисунок 7).

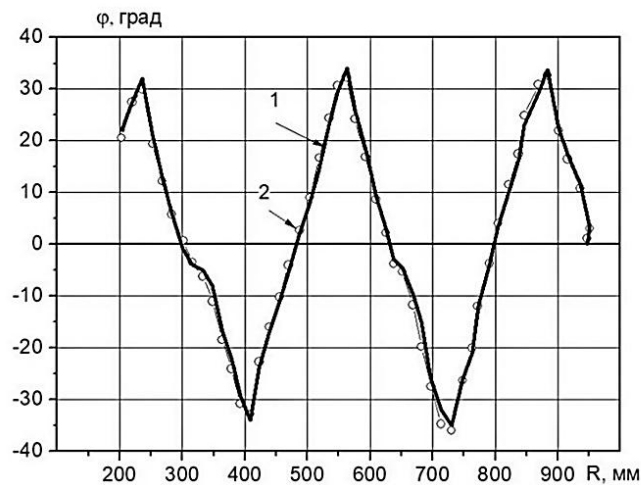


Рисунок 7 – Углы наклона макета самолета во время эксперимента (1 – эталонные данные, 2 – результат на выходе нейросети)

Расхождение между эталонными данными и результатами измерений, представленными на рисунках 5 и 6, не превышает 4 % и объясняется погрешностью работы кинематической схемы объекта, обеспечивающей линейное движение макета самолета и изменение его крена.

**Выводы.** Использование нейросетевой обработки данных позволяет сопоставить в соответствие этим измеряемые шесть параметров переменного магнитного поля ( $B'_{0x}, B'_{0y}, B'_{0z}$ ) и фаз ( $\varphi'_{0x}, \varphi'_{0y}, \varphi'_{0z}$ ) координатам подвижного объекта: линейным  $x, y, z$  и угловым  $\theta, \psi, \varphi$ . Повышение точности определения координат может быть достигнуто за счет оптимизации архитектуры искусственной нейросети и улучшения методики ее обучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашкаров А. Система спутниковой навигации ГЛОНАСС / М.: ДМК Пресс, 2018. 96 с.
2. Михайлов Р.Л. Радиоэлектронная борьба в вооруженных силах США: военно-теоретический труд. СПб.: Научное издание, 2018. 131 с.
3. Kalmus H.A. New Guiding and Tracking System // IRE Trans. Aerosp. Navig. Electron., vol. 9. Mar. 1962. P. 7–11.
4. Голев И.М., Сергеев А.В. Локальная система навигации с использованием низкочастотного магнитного поля // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 5. С. 88–94.
5. Голев И.М., Заенцева Т.И., Угрюмов Р.Б., Желонкин М.В., Попов А.С. Магнитометрическая система локальной навигации беспилотных летательных аппаратов // Научный информационный сборник «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление», 2020. № 8. С. 51–57.
6. Голев И.М., Заенцева Т.И., Желонкин М.В., Попов А.С. Анализ погрешностей определения линейных и угловых координат магнитометрической системы навигации беспилотного летательного аппарата // Научный информационный сборник «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление», 2020. № 8. С. 58–65.
7. Голев И.М., Никитина Е.А., Заенцева Т.И., Никитина Е.А., Бакланов И.О. Трехкоординатный индукционный датчик переменного магнитного поля для



магнитометрических систем локальной навигации // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 12. С. 91–99. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.академия-ввс.рф/images/docs/vks/12-2019/91-99.pdf> (дата обращения 01.05.2021).

8. Голев И.М., Заенцева Т.И., Попов А.С., Штанькова Н.В. Спектр магнитных шумов индуктивного датчика магнитометрической системы локальной навигации в неэкранированном пространстве // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 16. С. 154–163. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.академия-ввс.рф/images/docs/vks/16-2020/154-163.pdf> (дата обращения 01.05.2021).

9. Neural Network Toolbox. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://exponenta.ru/neural-network-toolbox> (дата обращения 03.03.2021).

10. Texas Instruments: DRV425 – высокоточный интегральный феррозондовый датчик магнитного поля DRV425 с аналоговым выходом. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.ebvnews.ru/technical/texas-instruments/6986.html> (дата обращения 03.03.2021).

11. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польского И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.

12. Тятюзов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. Кн. 28. М.: Радиотехника, 2009. 432 с.

13. Коротков В.Ф. Распознавание РЭС с использованием нейронных сетей: Монография. СПб.: ВУС, 2003. 156 с.

14. Гафаров Ф.М. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие / Ф.М. Гафаров, А.Ф. Галимянов. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. 121 с.

15. Нейронные сети на персональном компьютере / А.Н. Горбань, Д.А. Россиев. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. 276 с.

#### REFERENCES

1. Kashkarov A. Sistema sputnikovoj navigacii GLONASS / М.: DMK Press, 2018. 96 p.
2. Mihajlov R.L. Radioelektronnaya bor'ba v vooruzhennyh silah SSHA: voenno-teoreticheskij trud. SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2018. 131 p.
3. Kalmus H.A. New Guiding and Tracking System // IRE Trans. Aerosp. Navig. Electron., vol. 9. Mar. 1962. pp. 7–11.
4. Golev I.M., Sergeev A.V. Lokal'naya sistema navigacii s ispol'zovaniem nizkochastotnogo magnitnogo polya // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. T. 15. № 5. pp. 88–94.
5. Golev I.M., Zaenceva T.I., Ugrjumov R.B., ZHelonkin M.V., Popov A.S. Magnitometrisheskaya sistema lokal'noj navigacii bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Nauchnyj informacionnyj sbornik «TRANSPORT: nauka, tekhnika, upravlenie», 2020. № 8. pp. 51–57.
6. Golev I.M., Zaenceva T.I., ZHelonkin M.V., Popov A.S. Analiz pogreshnostej opredeleniya linejnyh i uglovyh koordinat magnitometrisheskoj sistemy navigacii bespilotnogo letatel'nogo apparata // Nauchnyj informacionnyj sbornik «TRANSPORT: nauka, tekhnika, upravlenie», 2020. № 8. pp. 58–65.
7. Golev I.M., Nikitina E.A., Zaenceva T.I., Nikitina E.A., Baklanov I.O. Trekhkoordinatnyj indukcionnyj datchik peremennogo magnitnogo polya dlya magnitometrisheskih sistem lokal'noj navigacii // Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika. 2019. № 12. pp. 91–99. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.akademiya-vvs.rf/images/docs/vks/12-2019/91-99.pdf> (data obrashcheniya 01.05.2021).
8. Golev I.M., Zaenceva T.I., Popov A.S., SHtan'kova N.V. Spektr magnitnyh shumov induktivnogo datchika magnitometrisheskoj sistemy lokal'noj navigacii v neekranirovannom prostranstve // Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika. 2020. № 16. pp. 154–163. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.akademiya-vvs.rf/images/docs/vks/16-2020/154-163.pdf> (data obrashcheniya 01.05.2021).





9. Neural Network Toolbox. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa <https://exponenta.ru/neural-network-toolbox> (data obrashcheniya 03.03.2021).
10. Texas Instruments: DRV425 – vysokotochnyj integral'nyj ferrozondovyy datchik magnitnogo polya DRV425 s analogovym vyhodom. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa <http://www.ebvnews.ru/technical/texas-instruments/6986.html> (data obrashcheniya 03.03.2021).
11. Osovskij S. Nejronnye seti dlya obrabotki informacii / per. s pol'skogo I.D. Rudinskogo. M.: Finansy i statistika, 2002. 344 p.
12. Tyatuzov A.L. Nejronnye seti v zadachah radiolokacii. Kn. 28. M.: Radiotekhnika, 2009. 432 p.
13. Korotkov V.F. Raspoznavanie RES s ispol'zovaniem nejronnyh setej: Monografiya. SPb.: VUS, 2003. 156 p.
14. Gafarov F.M. Iskusstvennye nejronnye seti i prilozheniya: ucheb. posobie / F.M. Gafarov, A.F. Galimyanov. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 2018. 121 p.
15. Nejronnye seti na personal'nom komp'yutere / A.N. Gorban', D.A. Rossiev. Novosibirsk: Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN, 1996. 276 p.

© Голев И.М., Угрюмов Р.Б., Заенцева Т.И., Мандрыкин А.В., 2021

Голев Игорь Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, [imgolev@gmail.com](mailto:imgolev@gmail.com).

Угрюмов Роман Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, [urb31075@mail.ru](mailto:urb31075@mail.ru).

Заенцева Татьяна Игоревна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, [st-nfyz@yandex.ru](mailto:st-nfyz@yandex.ru).

Мандрыкин Алексей Валерьевич, начальник отделения (аппаратного) системы дальней радионавигации, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, [alex.mandrykin@yandex.ru](mailto:alex.mandrykin@yandex.ru).