

ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

ARTIFICIAL NEURAL NETS IN ELECTROMAGNETIC POSITIONING SYSTEMS

**E. Lukianov
V. Semenov
A. Dolgikh**

Summary. Today, local positioning systems are rapidly developing, and electromagnetic positioning systems (EMPS) are the most promising and poorly researched representative of them.

The article discusses the prospects and features of the use of artificial neural networks (ANN) in the EPMS. The process of creating and learning the ANN for a specific configuration of the system is discussed in detail. The results of modeling are analyzed. It is concluded that the intellectual approach has a significant advantage over any other methods with respect to EMS.

Keywords: induction EMF; artificial neural network; electromagnetic positioning system; motion tracking; intellectual approach; analytical approach.

Лукьянов Евгений Анатольевич

К.т.н., доцент, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Семенов Вячеслав Сергеевич

*Аспирант, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону
vsemenov@donstu.ru*

Долгих Алексей Владимирович

Магистрант, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация. Сегодня стремительно развиваются системы локального позиционирования, и системы электромагнитного позиционирования (СЭМП) — наиболее перспективный и малоизученный их представитель.

В статье обсуждаются перспективы и особенности применения искусственных нейронных сетей (ИНС) в СЭМП. Подробно рассмотрен процесс создания и обучения ИНС для определенной конфигурации системы. Проанализированы результаты моделирования. Дано заключение о значительном преимуществе интеллектуального подхода перед любыми другими методами в отношении СЭМП.

Ключевые слова: ЭДС индукции; искусственная нейронная сеть; система электромагнитного позиционирования; контроль движения; интеллектуальный подход; аналитический подход.

Введение

В случаях, когда требуется знать координаты положения некоторого объекта в пространстве, используются различные способы их получения. Эти способы могут быть разделены на две группы — контактные (когда имеется кинематическая связь датчика и объекта) и бесконтактные. Из бесконтактных методов наибольшее распространение получили оптические, однако им свойственны существенные недостатки. От этих недостатков свободны методы измерения, использующие эффекты электромагнитной индукции (электромагнитное позиционирование). В данной статье рассматриваются некоторые решения, которые могут быть использованы при построении систем определения линейных координат и угловой ориентации объекта в пространстве. Системы электромагнитного позиционирования (СЭМП) являются наиболее перспективными в этой области.

СЭМП функционируют на основе закона электромагнитной индукции Фарадея, который может быть записан следующим образом:

$$\varepsilon = -M \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

где ε — ЭДС индукции, M — взаимная индуктивность взаимодействующих контуров с током, I — ток в одном из контуров. Рассмотрим следующую задачу электромагнитного позиционирования для расчетной схемы, приведенной на рис. 1:

Дано:

- ◆ Источник детерминированного переменного электромагнитного поля (излучатель);
- ◆ Массив приемных катушек индуктивности (приемников) с детерминированными параметрами;
- ◆ Закон изменения ЭДС индукции в приемнике при изменении его расстояния и ориентации относительно излучателя;
- ◆ Взаимное расположение приемников в пространстве;
- ◆ Амплитуда ЭДС индукции в приемниках.

Найти:

- ◆ Линейные (x ; y ; z) и угловые (крен, тангаж) координаты излучателя в режиме soft real-time [2].

Источник детерминированного переменного электромагнитного поля (излучатель) — катушка ин-

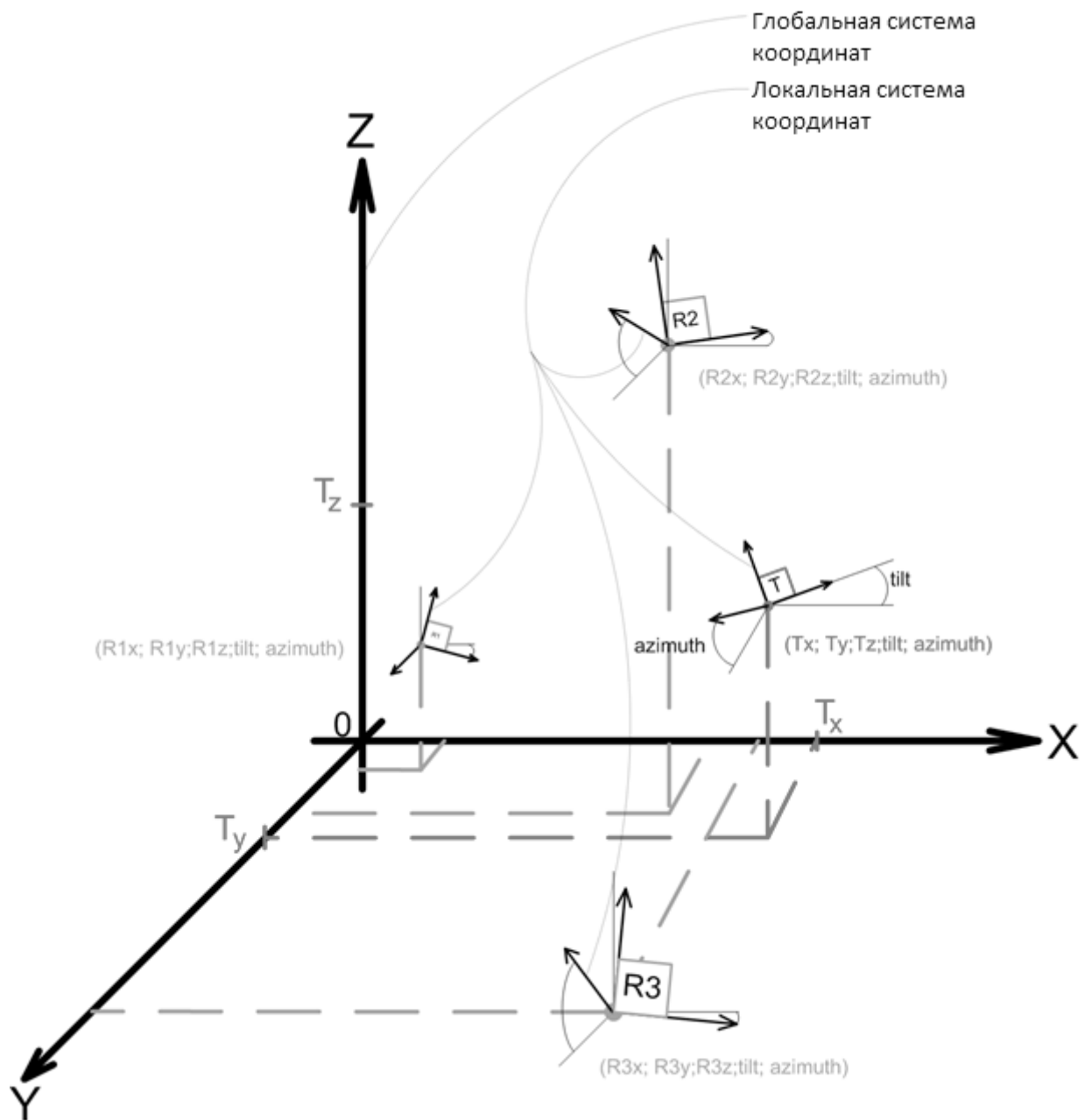


Рис.1. Расположение излучателя (R) и приемников (T) системы СЭМП. Положения и ориентации приемников известны. Положение и ориентация излучателя неизвестны

дуктивности, для которой известны параметры: количество витков, диаметр витков, индуктивность, закон изменения тока в обмотке и др. Приемник также представляет собой катушку индуктивности, в которой измеряется амплитуда наведенной излучателем ЭДС. Преобразования сигналов в СЭМП изображены на рис. 2.

Поскольку закон изменения тока

$$I = I_{max} \sin(\omega t) \quad (1)$$

в катушке излучателя постоянен, на индуцируемую в приемнике ЭДС влияет только взаимная индуктивность приемника и передатчика. При известных геометрических параметрах катушек, определение координат излучателя выполняется с использованием зависимости взаимной индуктивности от взаиморасположения катушек излучателя и приемника. В данной работе, расчет M проводился согласно схеме на рис. 3 [3].

Проблема выбора или создания наилучшего (время, точность вычислений) алгоритма расчета положения из-

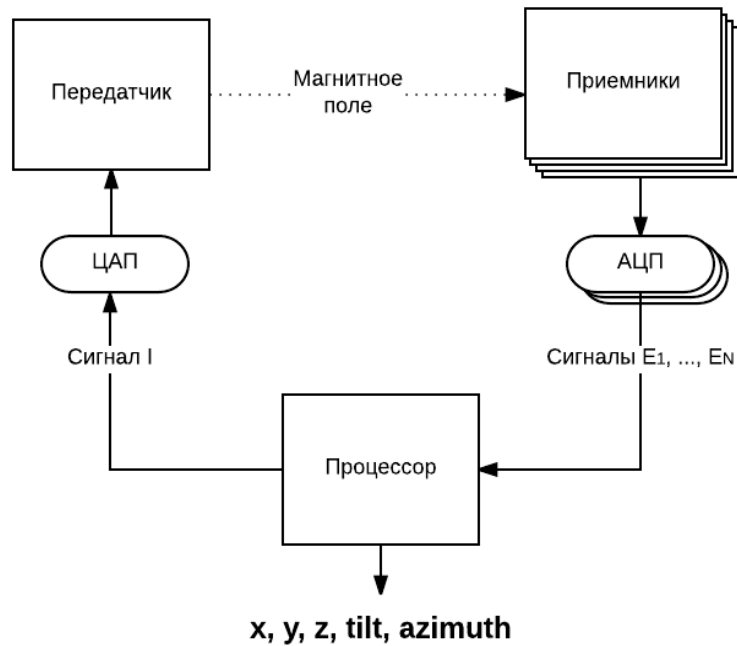


Рис. 2. Упрощенная структурная схема системы



Рис. 3. Расчет величины взаимной индуктивности

лучателя является наиболее обсуждаемой темой в области ЭМСП сегодня.

Основная часть

Определение положения и ориентации излучателя возможно на основе измерения ЭДС индукции, наведенной полем излучателя в приемниках. Для этого должны быть получены уравнения, описывающие зависимость амплитуды принятого сигнала от взаимной ориентации и расстояния между катушками излучателя и приемников. Существуют разные виды аналитического выражения зависимости ЭДС индукции в приемнике от расстояния и ориентации относительно излучателя, но общей для них является высокая вычислительная сложность, обусловленная многократным интегрированием [4–8, 12–14]. В настоящее время для решения задачи позиционирования, как правило, используют численно-аналити-

ческие методы [5,6,8], которые реализуют итеративный поиск решения и отличаются способами определения шага и градиента

$$K_n = K_{n-1} - grad(\text{ЦФ}) \cdot step, \quad (2)$$

где K_n — текущее решение в виде матрицы искомых координат, K_{n-1} — предыдущее решение (начальное приближение), ЦФ — целевая функция, step — шаг итерационного процесса. Поскольку определение координат излучателя выполняется в ходе многократных итерационных вычислений, общее время расчетов является большим [2]. Из-за этого такие методы не могут быть использованы в системах реального времени.

Одним из наиболее эффективных методов повышения скорости расчета является аппроксимация. Для этого выбирается более простая в смысле численных вы-

$$M = \frac{N_1 N_2}{(2S+1)(2N+1)(2m+1)(2n+1)} \sum_{g=-S}^S \sum_{h=-N}^N \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-n}^n M(g, h, p, q) \quad (4)$$

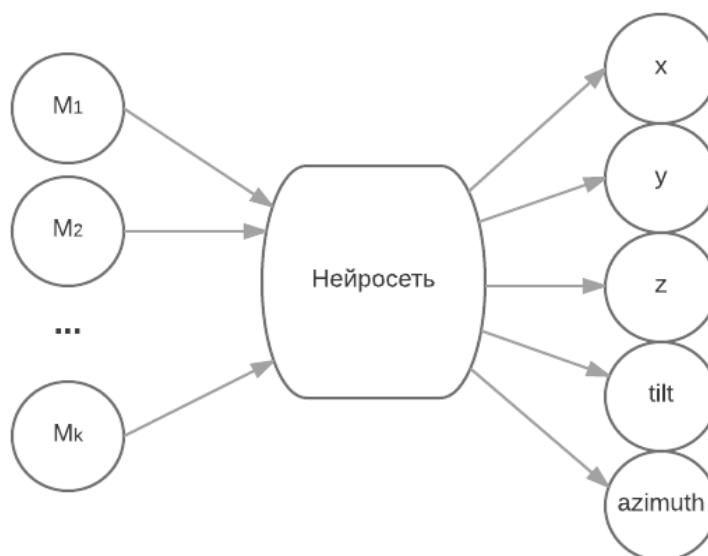


Рис. 4. Обобщенная схема нейросети для решения задачи электромагнитного позиционирования

числений функция, которая сможет повторять исходную функцию с заданной точностью в заданном диапазоне ее значений. Выполненные аналитические и экспериментальные исследования показали, что решение задач электромагнитного позиционирования может быть получено с использованием искусственных нейронных сетей [4].

При решении поставленной задачи электромагнитного позиционирования методами ИНС, входом сети является вектор значений взаимных индуктивностей приемников и излучателя ($M_1 \dots M_k$), а на выходе — вектор координат излучателя ($x, y, z, tilt, azimuth$), как изображено на рис. 4.

Для экспериментальных исследований была выбрана полносвязная нейронная сеть прямого распространения. Количество внутренних слоев сети — три. Обучающая выборка формировалась на основе метода С. Бабица, основные уравнения которого описывают взаимную индуктивность двух электрических контуров как:

$$M = \frac{\mu_0 R_S}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{[p_1 \cos\varphi + p_2 \sin\varphi + p_3] \Psi(k)}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi}} d\varphi, \quad (3)$$

и способ разбиения катушек на участки в виде (4), где M_k — взаимная индуктивность k -го приемника и излучателя; I — ток в катушке излучателя; R_S — радиус витков приемника; подынтегральное выражение в (3) — вычисление эллиптического интеграла по С. Бабицу; N_1, N_2 —

количества витков излучателя и приемника; S, N, m, n — параметры разбиения катушек по С. Бабицу [13].

Сферическая область, в пределах которой располагаются 6, 9 или 12 приемников, имеет радиус 62.5 см. Использовались следующие конструктивные параметры катушек индуктивности:

- ◆ количество витков у излучателя — 157
- ◆ количество витков у всех приемников — 158
- ◆ радиус излучателя — 1.53 см
- ◆ радиус приемников — 3.65 см
- ◆ длина излучателя — 9.4 см
- ◆ длины приемников — 0.35 см

Линейные координаты расположения излучателя изменялись в области ограниченной сферой с радиусом 200 мм. Угловые координаты излучателя изменялись в пределах 20°. Варьирование координат излучателя выполнялось с шагом 20 мм по линейным координатам и 1° по угловым координатам. Для каждого возможного положения излучателя вычислялись значения взаимной индуктивности $M_1 \dots M_k$. Все полученные значения были разделены на две выборки (обучающую и тестирующую) вида: $\{X, Y, Z, TILT, AZIMUTH, M_1 \dots M_k\}$, где X — вектор-столбец x -координат излучателя, Y — вектор-столбец y -координат излучателя, Z — вектор-столбец z -координат излучателя, $TILT$ — вектор-столбец первой угловой координаты излучателя, $AZIMUTH$ — вектор-столбец второй

Таблица 1. Карта отображения SNR в RMS.

SNR, dB	RMS, V
0	0.018858
5	0.010622
10	0.005969
15	0.003364
20	0.001883
25	0.00106
30	0.000597
35	0.000335
40	0.000189

координаты излучателя, $M_1 \dots M_k$ — матрица значений взаимных индуктивностей излучателя и приемников.

Обучающая выборка, полученная таким образом, состоит из N образцов. Количество свободных параметров нейронной сети ω выбиралось на основе теоремы Вапника-Червоненкиса (Vapnik-Chervonenkis Dimension — VCD) [13]:

$$\sqrt[4]{N} < \omega < \sqrt{N}. \tag{5}$$

Для $N=33300$, значение ω лежит в диапазоне 13...182. В данном исследовании, топология (в частности, количество нейронов в каждом слое) подбиралась с помощью генетических алгоритмов так, чтобы в итоге получить требуемое суммарное число свободных параметров нейросети. Такая сеть обучалась и тестировалась. Показатели тестирования для каждой из сформированных нейронных сетей фиксировались, затем выбиралась лучшая нейронная сеть. Важным является то, что перед обучением и тестированием нейронной сети тестовая выборка «зашумлялась» для имитации реальных условий. Это обусловлено тем, что практическое измерение ЭДС индукции в приемной катушке является нетривиальной задачей, требующей усиления, фильтрации и выделения полезного сигнала при наличии значительных шумов.

Для описания абсолютной величины шума авторы использовали понятие среднеквадратичного значения СКЗ (RMS):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n S_i^2}, \tag{6}$$

где n — количество отсчетов сигнала шума, S_i — значение i -го отсчета.

Для задания относительной величины шума, использовалось отношение сигнала к шуму (SNR):

$$SNR(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2, \tag{7}$$

где A_{signal} — среднеквадратичное значение амплитуды чистого сигнала, A_{noise} — среднеквадратичное значение амплитуды шума. На основе уравнений (6,7), была получена таблица 1, отображающая отношение сигнал-шум в абсолютное значение RMS ошибки. Полученные соответствия использовались для создания тестовых выборок, в которых ошибка измерения M соответствовала значениям SNR от 0 до 40 дБ.

Рассмотрим особенности нормировки данных для нейросети [16]. Входной слой проектируемой нейронной сети состоит из однородных признаков — значений взаимных индуктивностей, т.е. нормализация входных данных не требуется. А для выходного слоя нормализация может понадобиться, т.к. на выходе есть 2 группы нейронов: линейные и угловые координаты, измеряемые в метрах и радианах соответственно. Анализ их вклада в формулу взаимной индуктивности M сделать сложно, но, рассматривая разные значения координат, можно сделать вывод о том, что вклад каждой координаты существенен. Будем считать вклад одинаковым. Излучатель движется в сфере радиусом 20 см и значения линейных координат меняются в диапазоне (0.02; 0.42) метров, а угловые координаты меняются от 1° до 24°, что примерно соответствует диапазону (0.02; 0.42) радиан. Следовательно, вводить отдельную процедуру нормировки не требуется: все нейроны выходного слоя принимают значения от 0.02 до 0.42.

Поиск наилучшей топологии нейросети был автоматизирован следующим образом. Опираясь на теорему о размерности Вапника-Червоненкиса (VCD) и учитывая размер обучающей выборки, скрипт MATLAB формировал массив

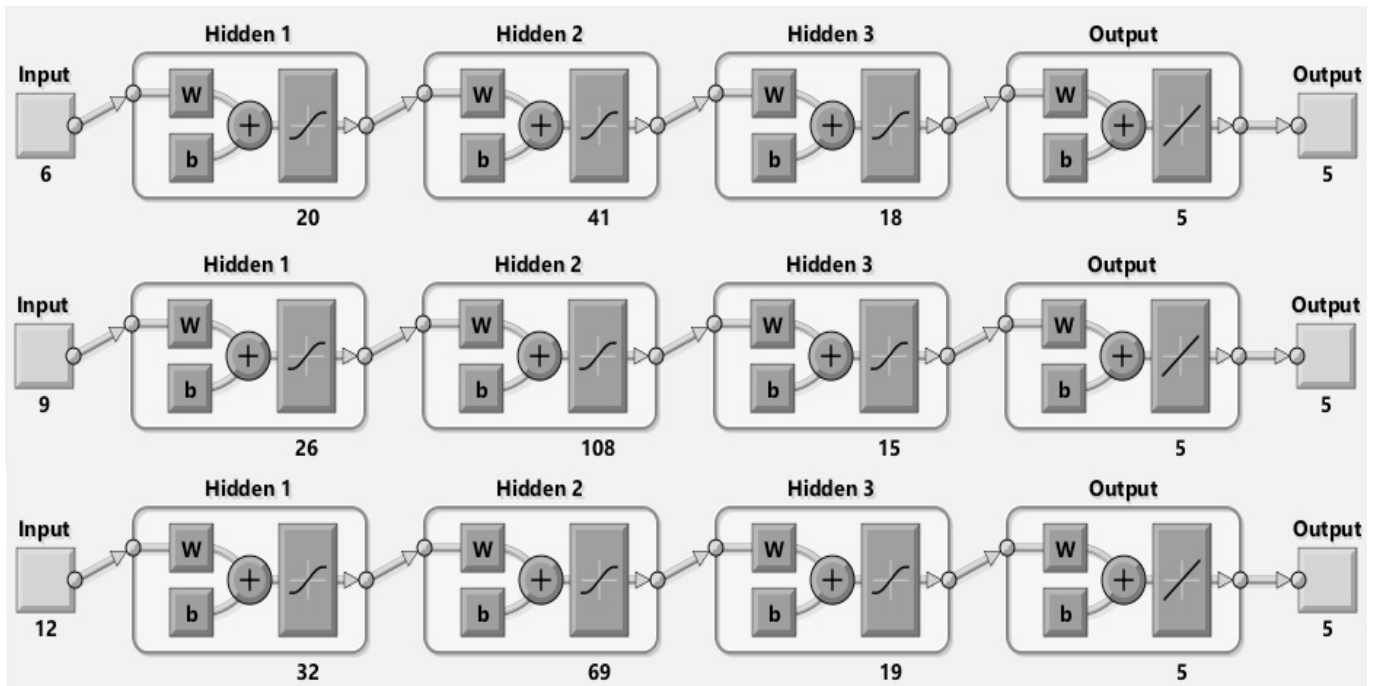


Рис. 5. Топология нейронной сети для конфигураций 6, 9 и 12 приемников, 1 излучатель.

$$\begin{pmatrix} [N_1, N_2, N_3]_1 \\ [N_1, N_2, N_3]_2 \\ \dots \\ [N_1, N_2, N_3]_m \end{pmatrix}$$

Для каждого из $[N_1, N_2, N_3]_i$ строилась и обучалась нейронная сеть. Находилась её ошибка обобщения. В итоге отбиралась нейросеть с наименьшей ошибкой обобщения.

Авторами было исследовано влияние следующих факторов на эффективность системы электромагнитного позиционирования на базе ИНС:

1) Количество скрытых слоев. При неизменном количестве свободных параметров количество слоев существенной роли не играло.

2) Количество свободных параметров нейросети. Наиболее важный параметр ИНС. Область поиска выбиралась на основе теоремы о VCD.

3) Способ построения обучающей выборки. Итеративный поиск размера шага сетки показал, что наилучший результат обучения, для рассмотренного примера, наблюдался при равномерной сетке разбиения пространства координат с шагом по линейным координатам в 2–3 см, а по угловым — в 2–3°.

4) Построение нейронных сетей, имеющих специфическую (описываемую вручную) топологию, не полностью связанных, рекуррентных и т.п., регистрируемых улучшений не обеспечивает.

5) Варьирование количества приемников (6, 9, 12) показало, что увеличение количества приемников повышает точность результата.

6) Эксперименты с взаимной ориентацией приемников (варьирование углов между осями индукции приемников) показали, что следует избегать параллельного расположения осей приемников.

7) Были проверены следующие алгоритмы обучения:

- a) *trainlm* — метод Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt)
- b) *trainbr* — баесовская регуляризация
- c) *trainbfg* — использование квази-Ньютоновского метода BFGS
- d) *traincgb* — метод связанных градиентов Пауэлла-Била (Powell-Beale)
- e) *traingd* — метод градиентного спуска
- f) *trainr* — метод случайных приращений.

Оказалось, что алгоритм Левенберга-Марквардта требует большого количества оперативной памяти, чего нельзя сказать о *traincgb* — методе связанных градиентов Пауэлла-Била (Powell-Beale), который мы и использовали. Можно констатировать, что метод *traincgb* хорошо

подходит для решения задачи электромагнитного позиционирования, так как обладает высокой скоростью сходимости.

В результате, для случая 6 приемников размер скрытых слоев лучшей нейронной сети составил {20, 41, 18}, 9 приемников — {26, 108, 15} и 12 приемников — {32, 69, 19}.

По результатам моделирования, ошибка определения линейных координат составила 0.53...11 мм, а угловых — 0.07...16°. При этом значения ошибок уменьшаются с уменьшением зашумленности и увеличением количества приемников. Например, при использовании 9 приемников и низком уровне шума (SNR=40 dB), максимальная ошибка по линейным координатам составила 0.53 мм, а по угловым — 0.07°. Среднее время решения

задачи определения 5 координат по взаимным индуктивностям приемников с излучателем составило от 0.007 до 0.0096 секунд, в зависимости от количества приемников.

Заключение

Результаты, полученные в ходе исследования, подтвердили высокую эффективность применения искусственных нейронных сетей для определения пространственных координат излучателя в СЭМП. Скорость вычислений и достигаемая точность подтверждают возможность проектирования СЭМП с заданными характеристиками для практического применения. Таким образом, авторы приходят к заключению о значительном преимуществе интеллектуального подхода перед другими методами, используемыми для решения задач СЭМП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Том 6: Электродинамика. Пер. с англ. / 3 изд. Эдиториал УРСС, 2004.
2. Shin, K.G.; Ramanathan, P. (Jan 1994). «Real-time computing: a new discipline of computer science and engineering» (PDF). *Proceedings of the IEEE*. IEEE. 82 (1): 6–24.
3. Калантаров П.Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Изд. 3-е, перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.
4. Лукьянов Е.А., Семенов В. С., Долгих А. В. Моделирование системы электромагнитного позиционирования на плоскости // Вестник современных исследований. Вып. № 1–1(4), янв., 2017. Научный центр «Орка». С. 88–98с
5. Lin D., Chen X. Mathematical Models of 3D Magnetic Field and 3D Positioning System by Magnetic Field // *Applied Mathematics & Information Sciences, An International Journal*, № 4, 2014.
6. Желамский М. В. Электромагнитное позиционирование подвижных объектов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 320 с
7. Волковицкий А.К., Каршаков Е. В., Павлов Б. В. Особенности обработки сигналов в низкочастотной электромагнитной системе относительного позиционирования // Труды IX международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'12. М., 2012. С. 279–286.
8. Qian Xiang, Shiqing Wang, Haifeng Liu. Fast numerical algorithm for a high-precision 6D electromagnetic positioning navigation system [Электронный ресурс] // *Turkish Journal of Physics*: [сайт]. [2014]. URL: <http://journals.tubitak.gov.tr/physics/issues/fiz-14-38-2/fiz-38-2-2-1310-8.pdf> (дата обращения: 04.06.2017).
9. Тугенгольд А.К., Интеллектуальные функции и управление автономными технологическими мехатронными объектам: монография / А. К. Тугенгольд, Е. А. Лукьянов. Ростов н/Д: Издат. центр ДГТУ, 2013. 203 с.
10. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, Изд. 2-е, пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 1408 с.
11. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия, Телеком, 2006. 452 с.
12. Babic S.I., Cevdet Akyel, and Mohamed-Mehdi Mahmoudi. Mutual Inductance Calculation between Circular Coils with Lateral and Angular Misalignment // *PIERS Proceedings, Moscow, Russia, August 18–21, 2009*.
13. Babic S.I., Sirois F., Cevdet Akyel, and Claudio Girardi. Mutual Inductance Calculation Between Circular Filaments Arbitrarily Positioned in Space: Alternative to Grover's Formula // *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 46, no. 9, september 2010.
14. Babic S.I., Jos'e Martinez, Cevdet Akyel, and Bojan Babic. Mutual Inductance Calculation between Misalignment Coils for Wireless Power Transfer of Energy // *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 38, 91–102, 2014.
15. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
16. Kelleher J.D., Mac Namee B., D'Arcy A. *Fundamentals of machine learning for predictive data analytics Algorithms: Worked Examples, and Case Studies*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2015.
17. Моделирование процессов электромагнитного взаимодействия двух электрических контуров // *EurasiaScience*. Сборник статей VII международной научно-практической конференции Москва, 31 января 2017 г. / Под. ред. В. Б. Соловьева. М.: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2017. С. 129–133.

© Лукьянов Евгений Анатольевич,

Семенов Вячеслав Сергеевич (vsemenov@donstu.ru), Долгих Алексей Владимирович.

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»