

УДК 537.86

EDN KIWFY

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДВУХОСНОГО МАГНИТНОГО
ИЗЛУЧАТЕЛЯ КИЛОМЕТРОВОГО
(ДЛИННОВОЛНОВОГО) ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

Л.П. Барабанова

ORCID: 0000-0002-3784-3787 e-mail: pbarabanova@yandex.ru

Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева
Ковров, Россия

Н.А. Кузнецов

ORCID: 0000-0001-6378-1156 e-mail: nick_phys@mail.ru

Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева
Ковров, Россия

В.С. Леонтьева

ORCID: 0009-0002-4118-1357 e-mail: leon@dksta.ru

Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева
Ковров, Россия

Разработан программно-аппаратный комплекс для реализации метода навигации беспилотных средств, одним из ключевых компонентов является двухосный магнитный излучатель километрового (длинноволнового) диапазона частот. Излучатель предназначен для создания переменного магнитного поля с характеристиками, позволяющими определять положение приемника относительно передатчика. При этом актуальным является определение охранной зоны излучателя. Для решения этой задачи выполнено математическое моделирование магнитного поля магнитного излучателя на основе использования закона Био-Савара-Лапласа. Полученные результаты моделирования были подтверждены путем экспериментальных исследований напряженности магнитного поля излучателя с помощью измерителя электромагнитного поля. Определена санитарная охранная зона в соответствии с требованиями п. 7.4. СанПиН 2.2.4.3359-16.

Ключевые слова: излучатель, магнитное поле, математическая модель, навигация, охранная зона.

Для цитирования: Барабанова Л.П., Кузнецов Н.А., Леонтьева В.С. Математическое моделирование магнитного поля двухосного магнитного

излучателя километрового (длинноволнового) диапазона частот системы электромагнитного позиционирования // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 74-83. EDN KIWUFY

MATHEMATICAL SIMULATION OF MAGNETIC FIELD OF KILOMETER (LONG-WAVE) FREQUENCY RANGE BIAxIAL MAGNETIC EMITTER OF ELECTROMAGNETIC POSITIONING SYSTEM

L.P. Barabanova

ORCID: 0000-0002-3784-3787 e-mail: pbarabanova@yandex.ru
The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev
Kovrov, Russia

N.A. Kuznetsov

ORCID: 0000-0001-6378-1156 e-mail: nick_phys@mail.ru
The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev
Kovrov, Russia

V.S. Loenteva

ORCID: 0009-0002-4118-1357 e-mail: leon@dksta.ru
The Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev
Kovrov, Russia

Abstract. The paper is devoted to the development of a software and hardware complex for the implementation of the unmanned vehicle navigation method, one of the key components of which is a biaxial magnetic emitter of a kilometer (long-wave) frequency range. The emitter is designed to create an alternating magnetic field with characteristics that allow determining the position of the receiver relative the transmitter. The definition of the emitter's protection zone is relevant. Mathematical modeling of the magnetic field of a magnetic emitter is performed to solve this problem based on the use of the Biot-Savart law. The obtained simulation results were confirmed by experimental studies of the intensity of the magnetic field of the emitter using an electromagnetic field meter. The sanitary protection zone was determined in accordance with the requirements of paragraph 7.4. of the Sanitary Rules and Regulations of the Russian Federation (SanPiN) 2.2.4.3359-16.

Keywords: emitter, magnetic field, mathematical model, navigation, protective zone.

For citation: L.P. Barabanova, N.A. Kuznetsov and V.S. Loenteva, "Mathematical simulation of magnetic field of kilometer (long-wave) frequency range biaxial magnetic emitter of the electromagnetic positioning system", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 74-83, 2025. EDN KIWUFY

I. Введение

Расчет магнитных полей катушек с заданными параметрами и пространственным расположением является актуальной задачей, решаемой при создании измерительных приборов и систем различного назначения.

В КГТА им. Дегтярева ведется разработка программно-аппаратного комплекса, реализующего метод навигации с использованием поля двух магнитных диполей [1-3]. Частью разрабатываемого комплекса является двухосный магнитный излучатель километрового (длинноволнового) диапазона частот, назначением которого является создание переменного магнитного поля с особыми характеристиками, позволяющими в окружающем пространстве однозначно определять пространственное положение приемника относительно передатчика. Данный элемент комплекса попадает под требования эксплуатации, регламентируемые п.7.4. и СанПиН 2.2.4.3359-16 [4].

Целью данной работы является определение охранной зоны излучателя на основе математического моделирования его магнитного поля, последующая экспериментальная апробация полученного результата.

II. Объект исследования

Выполнено математическое моделирование магнитного поля двухосного излучателя на предмет определения зоны с величиной предельно допустимой напряженности для нахождения человека.

Двухосный магнитный излучатель выполнен в виде двух круглых взаимно перпендикулярных рамок, каждая имеет 20 витков из медного провода диаметром 2,0 мм, выполненного в шелкоковой изоляции, диаметр средней линии катушки составляет 60 см. Внешний вид катушек излучателей представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид катушек излучателей

Fig. 1. Appearance of radiator coils

Источником энергии излучения выступает генератор сигналов низкочастотный, его ЭДС создает ток в катушке излучателя. Величина тока измеряется при помощи измерительного шунта и милливольтметра. Частота излучения определяется частотометром. Для компенсации индуктивной составляющей импеданса излучателя служит, включенный последовательно с ним, магазин емкостей, настройка передатчика сводится к подбору величины электроемкости посредством установления нулевого сдвига фаз тока и напряжения, детектируемого при помощи осциллографа. Структурная схема передатчика (один канал) представлена на рис. 2. Основные характеристики передатчика представлены в табл. 1.

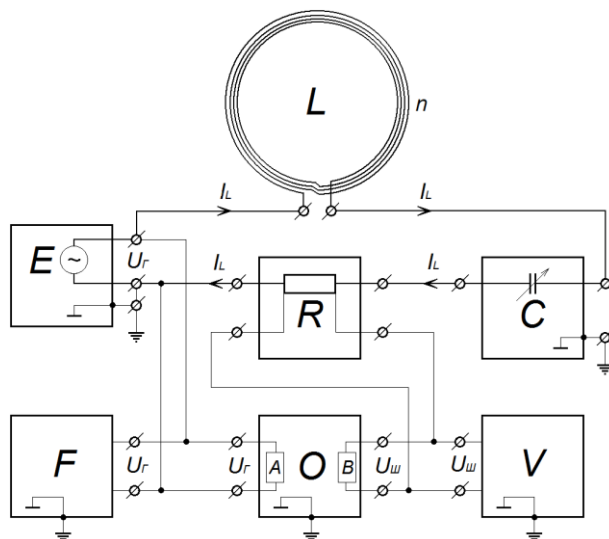


Рис. 2. Структурная схема передатчика (один канал):

L – катушка излучателя; E – генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109;

R – шунт измерительный 75ШСМЗ-20-0.5; C – магазин емкостей P544;

F – частотометр ЧЗ-57; O – осциллограф С1-157; V – милливольтметр ВЗ-38В

Fig. 2. Transmitter block diagram (one channel):

L – emitter coil; E – low-frequency signal generator ГЗ-109; R – measuring shunt

75ШСМЗ-20-0.5; C – capacities magazine P544; F – frequency meter ЧЗ-57;

O – oscilloscope С1-157; V – millivoltmeter ВЗ-38В

Основные характеристики передатчика представлены в табл. 1.

Требования эксплуатации данного излучателя регламентируются п.7.4. и СанПиН 2.2.4.3359-16, где величина предельно допустимого уровня напряженности магнитного поля диапазона частот 30 кГц...3 МГц составляет 50 А/м.

Таблица 1.
Основные характеристики передатчика

Table 1.
Main characteristics of the transmitter

№ п/п	Координата	Частота излучения, Гц	Напряжение на шунте, мВ	Ток рамки излучателя, А	Эквивалентный ток рамки излучателя, А*виток
1.	X (красная)	96 153,84	15,0	4,0	80,0
2.	Y (зеленая)	104 166,66	15,0	4,0	80,0

III. Численный эксперимент

Математическое моделирование магнитного поля излучателя производилось с помощью программного обеспечения - приложения созданного в интегрированной среде разработки *Visual Studio* [5, 6] с использованием языка алгоритмического программирования C++ [7, 8], основой которого является использование закона Био-Савара-Лапласа [9], согласно которому элементарным участком проводника $d\vec{l}$ в точке определяемой $\vec{r}$ создается магнитное поле напряженностью $d\vec{H}$ (1).

$$d\vec{H} = \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}. \quad (1)$$

Согласно (1), в произвольной точке пространства величина вектора напряженности излучателей определится как:

$$\vec{H}_1 = \frac{I_1}{4\pi} \oint_{L_1} \frac{[d\vec{l}_1, \vec{r}_1]}{r_1^3}; \quad (2)$$

$$\vec{H}_2 = \frac{I_2}{4\pi} \oint_{L_2} \frac{[d\vec{l}_2, \vec{r}_2]}{r_2^3}, \quad (3)$$

где I_1 и I_2 – ток первого и второго излучателя.

На рис. 3 показано пространственное расположение магнитных диполей, ориентированных по направлениям создаваемым ими магнитных моментов – вдоль осей координат X и Y, им соответствуют замкнутые контуры L_1 и L_2 с направлениями обхода обозначенными векторами $d\vec{l}_1$ и $d\vec{l}_2$. Радиус векторы $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ определяют положение рассматриваемой точке пространства, для которой определяются значения напряженности магнитного поля создаваемое каждым из диполей.

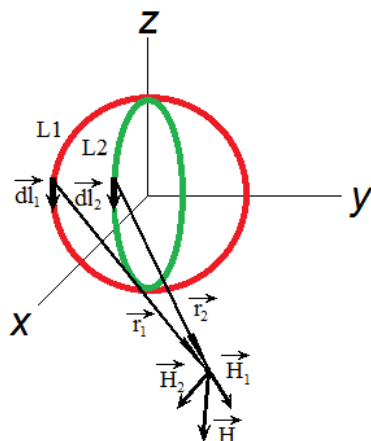


Рис. 3. Пространственное расположение векторных величин для произвольной точки пространства:
красный контур – первый излучатель; зеленый контур – второй излучатель

Fig. 3. Spatial arrangement of vector quantities for an arbitrary point in space:
red contour – first emitter; green contour – second emitter

Выражения (2) и (3) не позволяют аналитически определить значения вектора напряженности излучателей во всех точках окружающего пространства, однако позволяют определить его численно [10, 11].

В ходе численного математического моделирования были приняты следующие допущения:

- при численном определении значений интегралов (2) и (3) производилось разбиение протяженности контуров на 360 частей;
- расчет производился для пространства вне дистанции 3 см от рамок излучателей;
- шаг сетки пространственного разбиения был принят равным 2 мм;
- растр поля расчета 512 x 512 точек.

Проверка точности используемой математической модели осуществлялась по сличению результатов ее расчета с величинами напряженности магнитного поля, определенными на осях координат с использованием существующих аналитических выражений. С учетом принятых допущений математической модели, расхождение в расчетных величинах составило менее 0,1 %.

На рис. 4 и 5 приведен результат численного математического моделирования в сечении плоскости XOY – цветовые поля компонент вектора напряженности магнитного поля первого и второго излучателя соответственно. Места пересечения рамок излучателей с рассматриваемой плоскостью обозначены точками и перекрестьями соответствующие направлениям

протекания токов рамок I_1 и I_2 . Белыми точками ограничены замкнутые пространства, в которых величина рассматриваемой компоненты вектора напряженности магнитного поля превышает пороговое значение 50 А/м, определенное в [4].

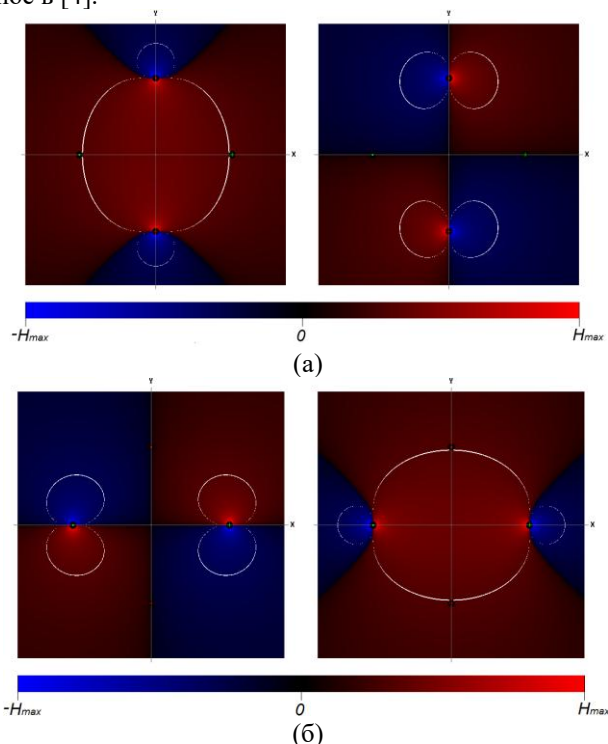


Рис. 4. Магнитное поле:
первого излучателя – слева $\vec{H}_{1x}(x,y)$, справа $\vec{H}_{1y}(x,y)$ (а);
второго излучателя – слева $\vec{H}_{2x}(x,y)$, справа $\vec{H}_{2y}(x,y)$ (б)

Fig. 4. Magnetic field of:
the first radiator – left $\vec{H}_{1x}(x,y)$, right $\vec{H}_{1y}(x,y)$ (а);
the second radiator – left $\vec{H}_{2x}(x,y)$, right $\vec{H}_{2y}(x,y)$ (б)

Результирующее значение вектора напряженности магнитного поля системы двух излучателей определяется по принципу суперпозиции магнитных полей, создаваемых каждым из излучателей в отдельности:

$$\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2. \quad (4)$$

На рис. 5 представлено цветовое поле модуля напряженности магнитного поля системы двух излучателей. Белыми точками ограничено замкнутое пространство, в котором величина модуля вектора напряженности магнитного поля превышает допустимое пороговое значение.

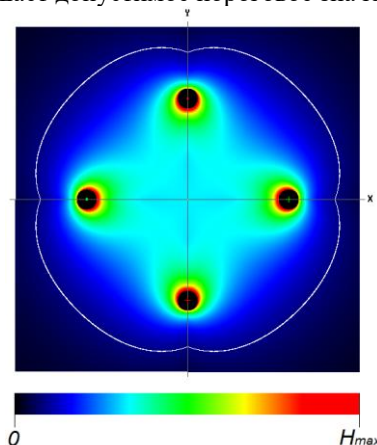


Рис. 5. Магнитное поле излучателя $|\vec{H}(x, y)|$ в горизонтальной плоскости, проходящей через его центр – белым показана линия уровня 50 А/м

Fig. 5. The magnetic field of the emitter $|\vec{H}(x, y)|$ in the horizontal plane passing through its center – white shows a level line of 50 A/m

Таким образом, по результатам численного математического моделирования предельная дистанция санитарной охранной зоны излучателя составляет 0,5 м. Полученный результат расчета экспериментально подтвержден измерением напряженности магнитного поля излучателя с помощью измерителя электромагнитного поля *GM3120*.

IV. Заключение

По результатам математического моделирования поля двухосного магнитного излучателя километрового (длинноволнового) диапазона частот системы электромагнитного позиционирования с дальнейшей экспериментальной апробацией определена охранная зона в соответствии с требованиями п. 7.4. СанПиН 2.2.4.3359-16 – зона с максимальным удалением от центра излучателей 0,5 метра для случая величины эквивалентного тока витка 80 А.

Полученный результат также может быть использован в оценке электромагнитной совместимости излучателя с иной аппаратурой.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FZEF–2024–0001.

© Барабанова Л.П., 2025

© Кузнецов Н.А., 2025

© Леонтьева В.С., 2025

Поступила в редакцию 09.06.2025

Принята к публикации 24.07.2025

Received 09.06.2025

Accepted 24.07.2025

Библиографический список

- [1] Барабанова Л.П., Барабанов О.О. Эффективное решение задачи электромагнитного позиционирования на базе двухосного излучателя // Проблемы математического анализа. 2021. Вып. 109. С. 17-25.
- [2] Abrudan T.E., Xiao Z., Markham A., Trigoni N. Underground incrementally deployed magneto-inductive 3-d positioning network traian // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2016. Vol. 54. No. 8. P. 4376-4391. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2540722
- [3] Павлов Б.В., Волковицкий А.К., Каршаков Е.В. Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации // Гироскопия и навигация. 2010. № 1. С. 3-11.
- [4] СанПиН 2.2.4.3359-16. «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».
- [5] Джонсон Б., Скибо К., Янг М. Основы Microsoft Visual Studio.NET 2003. М.: Русская Редакция, 2022. – 773 с.
- [6] Хандхаузен Р. Знакомство с Microsoft Visual Studio 2005 Team System. М.: Питер, Русская Редакция, 2021. – 402 с.
- [7] Понамарев В. Программирование на C++/C# в Visual Studio.NET 2003. М.: БХВ-Петербург, 2021. – 322 с.
- [8] Биллинг В.А. Основы программирования на C#. М.: Интернет-университет информационных технологий, Бином. Лаборатория знаний, 2021. – 488 с.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. «Теоретическая физика», том II. 7-е. изд. М.: Наука, 1988. – С. 512.
- [10] Прудников А.П., Бычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. М.: Наука, 1981.
- [11] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. – 720 с.

References

- [1] L.P. Barabanova and O.O. Barabanov, “Effective solution of the problem of electromagnetic positioning based on two-axial radiator”, *Journal of Mathematical Sciences*, vol. 255, no. 5, pp. 551-560, June 2021.
- [2] T.E. Abrudan, Zhuoling Xiao, A. Markham and N. Trigoni, “Underground incrementally deployed magneto-inductive 3-d positioning network traian”, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 54, no. 8, pp. 4376-4391, Aug. 2016. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2540722
- [3] B.V. Pavlov, A.K. Volkovickij and E.V. Karshakov, “Nizkochastotnaya elektromagnitnaya sistema otnositel'noj navigacii i orientacii [Low-frequency electromagnetic

- relative navigation and orientation system]”, *Gyroscopy and Navigation*, no. 1, pp. 3-11, 2010 (in Russian).
- [4] SanPiN 2.2.4.3359-16, “«Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary and epidemiological requirements for physical factors at workplaces]”, (in Russian).
- [5] B. Johnson, M. Young and C. Skibo, *Osnovy Microsoft Visual Studio .NET 2003 [Bases of Microsoft Visual Studio .NET 2003]*. Moscow: Russian Edition, 2022 (in Russian).
- [6] R. Hundhausen, *Znakomstvo s Microsoft Visual Studio 2005 Team System [Introduction to Microsoft Visual Studio 2005 Team System]*. Moscow: Peter, Russian Edition, 2021 (in Russian).
- [7] V. Ponamarev, *Programmirovaniye na C++/C# v Visual Studio .NET 2003 [C++/C# Programming in Visual Studio .NET 2003]*. Moscow: BHV-Petersburg, 2021 (in Russian).
- [8] V.A. Billig, *Osnovy programmirovaniya na C# [Fundamentals of programming in C#]*. Moscow: Internet University of Information Technologies, Binom. Knowledge Laboratory, 2021 (in Russian).
- [9] L.D. Landau and E.M. Lifshic, *Teoriya polya [Field theory]*. Moscow: Science, 1988 (in Russian).
- [10] A.P. Prudnikov, Yu.A. Bychkov and O.I. Marichev, *Integraly i ryady [Integrals and series]*. Moscow: Nauka, 1981 (in Russian).
- [11] G. Korn and T. Korn, *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematics Handbook for Scientists and Engineers]*. Moscow: Nauka, 1968 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Барабанова Любовь Петровна, кандидат физико-математических наук, доцент Ковровской государственной технологической академии имени В.А. Дегтярева, г. Ковров, Российская Федерация.

Lyubov P. Barabanova, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), associate professor of the Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russian Federation.

Кузнецов Николай Александрович, кандидат технических, заведующий кафедрой Ковровской государственной технологической академии имени В.А. Дегтярева, г. Ковров, Российская Федерация.

Nikolay A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), head of the chair of the Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russian Federation.

Леонтьева Виктория Станиславовна, старший преподаватель Ковровской государственной технологической академии имени В.А. Дегтярева, г. Ковров, Российская Федерация.

Victoria S. Loenteva, senior lecturer of the Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russian Federation.