



УДК 621.317.44
ГРНТИ 90.27.34

ТРЕХКООРДИНАТНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

*И.М. ГОЛЕВ, доктор физико-математических наук, профессор
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)
Е.А. НИКИТИНА, кандидат физико-математических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
И.О. БАКЛАНОВ, доктор педагогических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье предложена конструкция трехкоординатного индукционного датчика переменного низкочастотного магнитного поля для систем локальной навигации подвижных объектов в искусственно созданном магнитном поле. Определены основные параметры датчика и факторы, влияющие на точность измерений. Описаны алгоритмы обработки сигналов при измерении трех взаимно ортогональных компонент вектора магнитной индукции. Показана возможность применения трехкоординатного индукционного датчика для измерения градиента магнитной индукции, что существенно повышает точность решения задач навигации и обнаружения.

Ключевые слова: индукционный датчик, магнитометрический датчик, магнитометрические навигационные системы, низкочастотное магнитное поле, градиентометр.

THREE-ORDINATION INDUCTION SENSOR FOR A VARIABLE MAGNETIC FIELD FOR MAGNETOMETRIC SYSTEMS OF LOCAL NAVIGATION

*I.M. GOLEV, Doctor of Physico-Mathematical sciences, Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
T.I. ZAENTSEVA, Candidate of Physico-Mathematical sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
E.A. NIKITINA, Candidate of Physico-Mathematical sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
I.O. BAKLANOV, Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article proposes a design of a three-coordinate induction sensor of alternating low-frequency magnetic field for local navigation systems of moving objects in an artificially created magnetic field. The main parameters of the sensor and factors affecting the accuracy of measurements are determined. Signal processing algorithms for measuring three mutually orthogonal components of the magnetic induction vector are described. The possibility of using a three-coordinate induction sensor to measure the magnetic induction gradient is shown, which significantly increases the accuracy of solving navigation and detection problems.

Keywords: induction sensor, magnetometric sensor, magnetometric navigation systems, low-frequency magnetic field, gradiometer.



Введение. Прецизионные измерения параметров магнитного поля активно используются в различных областях науки и техники: в задачах локальной и глобальной навигации, обнаружения ферромагнитных объектов, гражданских или военного назначения, медицинской диагностики, геологоразведки и т.п. [1]. В настоящее время решение задач обеспечения прецизионных измерений особенно актуально для систем навигации по магнитному полю, как Земли и промышленных объектов, так и искусственно созданному [2, 3]. Магнитометрические навигационные системы используются при решении навигационных задач в сложных климатических и метеорологических условиях, а также при наличии электромагнитных помех различной природы. Одним из главных компонентов магнитометрической навигационной системы, обеспечивающим, в конечном итоге, точность навигационных определений, является блок магнитометрических датчиков. Характеристики магнитного поля, измеренные датчиками, сопоставляются с координатами подвижного объекта по трехмерным магнитным картам или же по известным аналитическим зависимостям компонент поля от времени и координат.

На практике измеряются следующие характеристики магнитного поля:
модуль вектора магнитной индукции B .

три взаимно ортогональные компоненты вектора индукции магнитного поля $B_i - B_x, B_y, B_z$.

Дополнительно к измерениям указанных величин, некоторые магнитометрические системы также определяют градиента модуля или компонент вектора магнитной индукции. Использование значений производных магнитного поля по направлению позволяет уменьшить влияние помех, локализовать источники магнитного поля, компенсировать влияние электромагнитных шумов носителей магнитометрической аппаратуры [4].

Актуальность. Магнитометрические системы навигации изначально развивались как системы, регистрирующие компоненту магнитного поля Земли, которая не изменяется в течение десятков лет и обусловлена намагниченностью пород – аномальное поле Земли. Поэтому на практике активнее применялись датчики, позволяющие измерять постоянное магнитное поле (феррозондовые (векторные) датчики, датчики на основе гигантского магниторезистивного и спин-туннельного эффекта, ядерного магнитного резонанса, квантовые магнитометры с оптической накачкой). Указанные датчики обладают сложной конструкцией и технологией изготовления. В настоящее время развиваются магнитометрические системы, использующие для навигации искусственно созданное переменное магнитное поле (поле магнитных маяков), определяющие все координаты подвижного объекта и не требующие наличия магнитных карт. Для таких систем целесообразно использовать датчики с высокими быстродействием и чувствительностью, способными регистрировать магнитное поле в широком диапазоне частот. Наиболее подходящими характеристиками для решения указанной задачи являются индукционные датчики. Они обладают высокими метрологическими параметрами, являются векторными и пассивными, имеют простую конструкцию и технологию изготовления, позволяют проводить измерения в диапазоне от долей герца до десятков килогерц, обладают пороговой чувствительностью порядка $10^{-2} \div 10^{-5}$ нТл, что сравнимо с чувствительностью магнитометров на основе сверхпроводящих квантовых интерферометрических датчиков (СКВИДов) [5–9]. Однако в литературе представлено очень мало описаний трехкомпонентных индукционных датчиков.

Работа посвящена созданию трехкоординатного индукционного датчика переменного низкочастотного магнитного поля для систем локальной навигации объектов с использованием маяка, создающего в навигационном пространстве переменное магнитное поле.

Основные метрологические характеристики индукционных датчиков. При использовании магнитометрических датчиков в системах навигации наиболее существенными параметрами являются коэффициент преобразования, определяющий чувствительность датчика, а также предельная чувствительность, определяемая спектром собственных шумов и рабочей полосой пропускания [10].



Конструкционно индукционный датчик представляет собой катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником вместе с предварительным усилителем.

Метод работы индукционных датчиков основывается на законе Фарадея:

$$e(t) = -\mu_{эфф} NS \frac{dB}{dt}, \tag{1}$$

где $e(t)$ – электродвижущая сила на катушке индуктивности датчика, содержащей N витков; S – эффективная площадь сечения катушки; B – индукция измеряемого магнитного поля; $\mu_{эфф}$ – эффективная магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника катушки.

Если магнитное поле изменяется по гармоническому закону $B(t) = B_m \cos(2\pi ft)$, то зависимость $e(t)$ выглядит следующим образом:

$$e(t) = 2\pi f \mu_{эфф} NS B_m \sin(2\pi ft), \tag{2}$$

что позволяет вычислить индукцию магнитного поля по измерениям ЭДС индукции.

Отношение амплитуды электродвижущей силы к амплитуде индукции магнитного поля называется коэффициентом преобразования датчика:

$$K_o = \frac{e_m}{B_m} = 2\pi f \mu_{эфф} NS, [B/Тл]. \tag{3}$$

На рисунке 1 представлена эквивалентная схема индукционного датчика, где $e(t)$ – источник ЭДС; L – собственная индуктивность катушки датчика.

Собственные шумы датчика имеют три основных источника: тепловые шумы на активном сопротивлении, тепловые шумы на емкости и магнитные шумы [11].

Омическое сопротивление катушки r_0 создает в полосе частот Δf тепловые шумы [11, 12]:

$$U_{шт} = (4kTr_0\Delta f)^{1/2}. \tag{4}$$

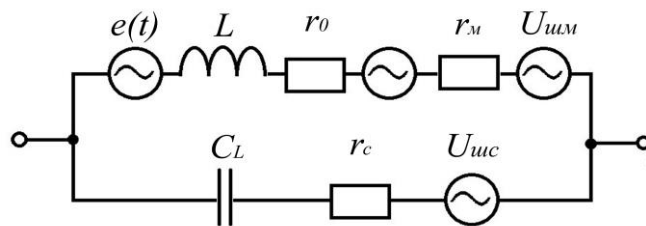


Рисунок 1 – Эквивалентная схема индукционного датчика

Наличие ферромагнитного сердечника приводит к возникновению гистерезисных и вихревых потерь энергии магнитного поля в его объеме, что можно характеризовать сопротивлением потерь r_m , являющегося источником магнитных шумов $U_{шм}$ [11]:

$$r_m = 2\pi f L tg(\delta_L),$$

где $tg(\delta_L)$ – тангенс угла потерь в ферромагнитном сердечнике,



$$U_{ум} = (4kTr_m \Delta f)^{1/2}. \quad (5)$$

Катушка датчика обладает межвитковой (паразитной) емкостью C_L , которая характеризуется сопротивлением утечки

$$r_C = \operatorname{tg}(\delta_C) / (2\pi f C_L),$$

где $\operatorname{tg}(\delta_C)$ – тангенс угла потерь в конденсаторе. При этом тепловые шумы сопротивления r_C равны

$$U_{uC} = (4kTr_C \Delta f)^{1/2}. \quad (6)$$

Напряжения теплового шума, генерируемые сопротивлениями r_m , r_m и r_C статистически независимы, поэтому напряжение шума на выходе индукционного датчика, являющегося линейной цепью, равно

$$U_{шд} = \sqrt{U_{шГ}^2 + U_{ум}^2 + U_{uC}^2}. \quad (7)$$

Предельная чувствительность зависит также от полосы пропускания датчика Δf , которая, в свою очередь, для задач навигации определяется скоростью движения подвижного объекта. Например, при скорости движения подвижного объекта $V_{об} = 30$ м/с для достижения точности измерений линейных координат не менее 0,2 м количество отсчетов за одну секунду должно быть равно 150. В соответствии с теоремой Котельникова требуемая полоса частот пропускания измерительного тракта должна быть в этом случае не менее 300 Гц.

Особенности трехкоординатных индукционных датчиков. Для решения задач определения шести координат подвижного объекта в переменном магнитном поле необходимо и достаточно производить измерения амплитуды и фазы компонент вектора магнитной индукции на трех взаимно ортогональных датчиках [13]. Для корректного измерения компонент магнитного поля большое значение имеют точность ориентирования магнитных осей катушек индуктивности, также взаимное влияние катушек друг на друга.

Для трехкоординатного датчика важно обеспечить совпадение геометрических и магнитных осей и их взаимную ортогональность. Отклонение магнитной оси катушки индуктивности от соответствующих осей системы координат на некоторый угол $\Delta\delta_i$ эквивалентно уменьшению коэффициента преобразования

$$K_{\partial\partial\phi_i} = K_{\partial\partial i} \cos(\Delta\phi_i),$$

где $K_{\partial\partial\phi_i}$, $K_{\partial\partial i}$ – реальное и максимальное значения коэффициентов преобразования датчика соответственно.

Для корректной калибровки датчика необходимо учитывать погрешности установки углов во всех трех координатных плоскостях.

Кроме того, возникновение переменной ЭДС в одной катушке приводит к возникновению ложного сигнала в других катушках, что также искажает результаты измерений. Для уменьшения этой погрешности необходимо максимально уменьшить взаимную индукцию катушек за счет обеспечения ортогональности их магнитных осей. Оценку взаимного влияния катушек трехкоординатного датчика можно провести с помощью передаточного коэффициента $K_{пер_i}$:



$$K_{неpi} = \frac{U_{i\perp}}{U_{0i}},$$

где U_{0i} – напряжение, поданное на одну катушку, $U_{i\perp}$ – напряжение, возникающее на катушках, перпендикулярных данной.

Из (3) следует, что коэффициент преобразования линейно зависит от следующих параметров: частоты магнитного поля f , числа витков катушки N , эффективной площади ее сечения S и эффективной магнитной проницаемости сердечника $\mu_{эфф}$.

Важное значение имеет величина эффективной магнитной проницаемости сердечника $\mu_{эфф}$. Инженерная формула для ее расчета [12] учитывает длину сердечника l_c и катушки l_k , площадь поперечного сечения сердечника S , его начальную проницаемость μ_n :

$$\mu_{эфф} = \frac{\mu_n \left(1 - 0,25 \left(\frac{l_k}{l_c} \right)^2 \right)}{1 + 0,975(S/l_c^2) \cdot (\ln(l_c \cdot \sqrt{\pi/S}) - 1) \cdot (\mu_n - 1)}. \quad (8)$$

Представленная зависимость демонстрирует, что геометрические размеры существенно влияют на эффективную магнитную проницаемость. Введем в рассмотрение величину отношения длины сердечника к его диаметру $a = l_c/D_c$. Преобразуем выражение (8) с учетом введенной величины.

$$\mu_{эфф} = \frac{\mu_n (1 - 0,25 \left(\frac{l_k}{l_c} \right)^2)}{1 + \frac{0,975}{a^2} (\ln(2a) - 1) (\mu_n - 1)}. \quad (9)$$

В знаменателе выражения стоит произведение степенной и логарифмической функций. С ростом отношения $a = l_c/D_c$ первый сомножитель убывает, тогда как второй возрастает, однако первая функция возрастает быстрее. Следовательно, с ростом отношения длины сердечника к его диаметру эффективная магнитная проницаемость будет возрастать.

Конструкция и электрические параметры датчика. С учетом выполненного анализа была разработана конструкция трехосевого индукционного датчика, изготовлен макет датчик и проведена оценка его основных параметров (рисунок 2).

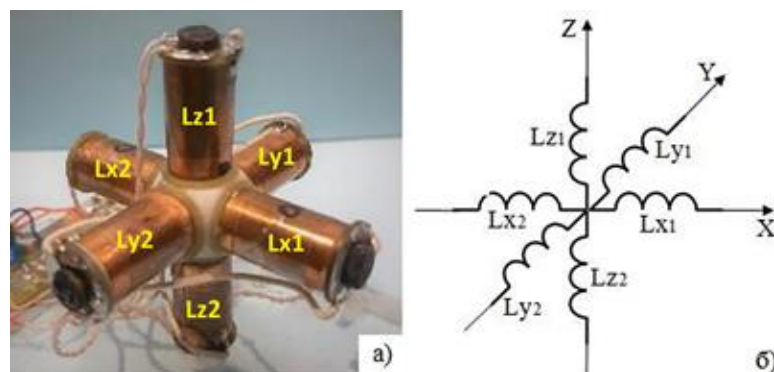


Рисунок 2 – а) – фотография трехкоординатного градиентометрического индукционного датчика
б) – эквивалентная схема датчика, шесть катушек индуктивности: $L_{x1}, L_{x2}, L_{y1}, L_{y2}, L_{z1}, L_{z2}$



Датчик состоит из шести одинаковых катушек индуктивности L_{x1} и L_{x2} ; L_{y1} и L_{y2} ; L_{z1} и L_{z2} попарно расположенных вдоль осей x , y и z соответственно и образующих конструкцию, симметричную относительно геометрического и магнитного центров.

Катушки индуктивности имеют следующие конструкционные параметры:

длина сердечника $l_c=25$ мм, диаметр сердечника $D_c=6$ мм, марка феррита М2000НМ1;

тангенс угла потерь $tg(\delta_c)=0,02$;

длина катушки $l_k=22$ мм, $D_k=12$ мм; число витков $N=7500$, использовался провод ПЭВ-1 с диаметром жилы 0,05 мм и внешним диаметром 0,062 мм.

Электрические параметры катушек на частоте 10 кГц:

действующее значение индуктивности $L_{ij}=2.05\pm 0.04$ Гн;

электрическая добротность на частоте 10 кГц $Q=16\pm 3$;

паразитная емкость $r_c=38$ пФ;

омическое сопротивление $r_m=1630\pm 30$ Ом.

При амплитудном значении индукции переменного магнитного поля $B_m = 0,1$ нТл, в полосе частот 300 Гц амплитуда электродвижущей силы на каждой из катушек индуктивности равна $e_m=6,8$ мкВ, а коэффициент преобразования датчика 68 мкВ/нТл (формула (3)).

Отметим, что датчик изготавливается из шести одинаковых катушек индуктивностей, что является более простой технологической задачей, чем, например, изготовление специальных крестообразных магнитопроводов. Причем конструкция обладает центральной геометрической симметрией, что существенно снижает взаимную индукцию катушек.

Величина тепловых шумов катушки согласно выражению (4) в полосе частот Δf $U_{шT} = 0,089$ мкВ, $U_{шш} = 0,086$ мкВ (5), шумы сопротивления утечки конденсатора (см. выражение (6)) $U_{шC} = 0,1$ мкВ. В соответствии с (7) общее сопротивление шума индуктивного датчика в выбранной полосе равно $U_{шд} = 0,13$ мкВ. Учитывая согласно (3) полученные значения коэффициента преобразования, магнитные шумы датчика будут составлять $\delta B = 2$ пкТл. Однако, это расчетное значение чувствительности датчика получено без учета внешних магнитных помех. Отметим, что на частоте 10^4 Гц геомагнитный шум Земли $\sim 0,01$ нТл, промышленный шум лежит в пределах $0,1 \div 1$ нТл [14].

Проведение измерений и обработка сигналов. Сигналы с каждой пары датчиков, ориентированных вдоль осей декартовой системы координат, подаются на предварительные усилители ОУ1 и ОУ2 с коэффициентом усиления 10. На рисунке 3, для примера, приведена упрощенная схема обработки напряжений с катушек, ориентированных вдоль оси Y.

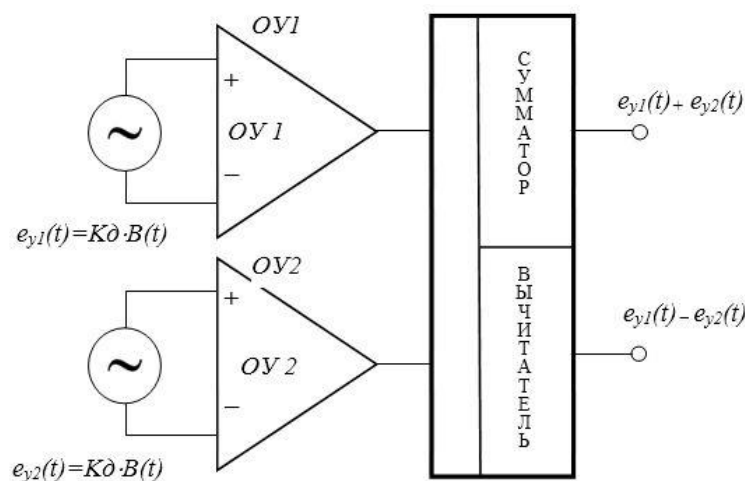


Рисунок 3 – Блок схема обработки сигналов с катушек индуктивности:
ОУ1, ОУ2 – прецизионные усилители типа ОРА177



В схеме происходит сложение и вычитание сигналов с двух катушек. Таким образом, в первом случае сигнал пропорционален индукции пространственной компоненты измеряемого магнитного поля. Коэффициент преобразования двух последовательно включённых катушек равен сумме коэффициентов преобразования отдельных катушек и составляет 136 мкВ/нТл.

Разность сигналов с последовательно соединённых катушек индуктивности позволяет определить соответствующую компоненту градиента магнитного поля вдоль направления осей катушек:

$$\frac{\partial B_i}{\partial x_i} = \frac{e_{i1} - e_{i2}}{l_B}, \quad (10)$$

где $i=1,2,3$, что соответствует осям координат x , y и z соответственно; l_B – база градиентометра, расстояние между геометрическими центрами катушек. В рассматриваемом случае значение $l_B = 0,06$ м.

Чувствительность измерения градиента индукции магнитного поля при полученной чувствительности датчиков и выбранной базе градиентометра $\approx 0,3$ нТл/м. Для примера, такой градиент имеет магнитное поле диполя с магнитным моментом $M=10^4$ А·м² на расстоянии порядка 35 метров.

Для оценки взаимного влияния катушек трехкоординатного датчика на одну из трех катушек датчика подавалось напряжение с амплитудой 5 В и проводились измерения напряжения в режиме холостого хода на остальных катушках. Передаточный коэффициент $K_{пер}$ не превышал значения 10^{-3} , что является характерной величиной для низкочастотных систем с взаимно ортогональными катушками [9].

Выводы. В работе было показано, что трехкоординатные индукционные датчики могут быть эффективно применены в системах навигации по переменному магнитному полю. Предлагаемая в работе конструкция трехкоординатного индукционного датчика имеет простую технологию изготовления. Полученные параметры датчиков позволяют измерять пространственные компоненты вектора магнитной индукции на фоне геомагнитных и промышленных шумов, а также регистрировать изменение этих компонент вдоль осей чувствительности датчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голев И.М., Никитина Е.А., Сергеев А.В. Использование градиентных измерений магнитного поля для задач навигации и обнаружения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 156–162.
2. Голев И.М., Никитина Е.А. Технические аспекты измерения магнитного поля Земли в задаче воздушной навигации // Воздушно космические силы. Теория и практика. 2017. № 1. С. 272–278.
3. Голев И.М., Ницак Д.А., Никитина Е.А. Аспекты создания систем навигации с использованием геомагнитного поля Земли // сб. материалов XXIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2017. С. 1046–1053.
4. Маркова М.Н., Лапина Е.П. Высшие производные магнитного поля, их исследование и возможности практического использования для решения задач магнитометрии // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. праць. Киев, 2013. Вип. 10. С. 81–89.
5. James Lenz and Alan S. Edelstein Magnetic Sensors and Their Applications // IEEE SENSORS JOURNAL. 2006. Vol. 6. No. 3. P. 631–649.
6. Поляков С.В., Резников Б.И. и др. Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 1. С. 5–27.



7. Попов А.П., Чугулев А.О., Винокуров М.Р. Индукционный датчик линейных перемещений с отрицательной обратной связью по потокосцеплению обмотки возбуждения // Вестник ДГТУ. 2012. № 2 (63). вып. 1. С. 54–59.
8. Tumanski S. Induction coil sensors – a review // Meas. Sci. Technol. 2007. No. 18. P. 31–46.
9. Towards ultimate low frequency air-core magnetometer sensitivity / Ruben Pellicer-Guridi et al. // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. No. 2269. P. 1–12.
10. Мизнюк Л.Я. Входные преобразователи для измерения напряженности низкочастотных магнитных полей: Киев: Наукова думка. 1964. 168 с.
11. Якимов А.В. Физика шумов и флуктуации параметров: Электронное учебное пособие / А.В. Якимов. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. 85 с.
12. Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
13. An electromagnetic localization and orientation method based on rotating magnetic dipole/ S. Song et al // IEEE transaction on magnetic. 2013. V. 49, № 3, P. 1274–1277.
14. Введенский В.Л., Ожогин В.И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. 200 с.

REFERENCES

1. Golev I.M., Nikitina E.A., Sergeev A.V. Ispol'zovanie gradientnyh izmerenij magnitnogo polya dlya zadach navigacii i obnaruzheniya// Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2018. T. 14. № 3. pp. 156–162.
2. Golev I.M., Nikitina E.A. Tehničeskie aspekty izmereniya magnitnogo polya Zemli v zadache vozdušnoy navigacii // Vozdušno kosmičeskie sily. Teoriya i praktika. 2017. № 1. pp. 272–278.
3. Golev I.M., Nicak D.A., Nikitina E.A. Aspekty sozdaniya sistem navigacii s ispol'zovaniem geomagnitnogo polya Zemli // sb. materialov XXIII mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii «Radiolokaciya, navigaciya, svyaz». Voronezh, 2017. pp. 1046–1053.
4. Markova M.N., Lapina E.P. Vysshie proizvodnye magnitnogo polya, ih issledovanie i vozmožnosti praktičeskogo ispol'zovaniya dlya resheniya zadach magnitometrii // Teoretični ta prikladni aspekti geoinformatiki: Zb. nauk. prac'. Kiev, 2013. Vip. 10. pp. 81–89.
5. James Lenz and Alan S. Edelstein Magnetic Sensors and Their Applications // IEEE SENSORS JOURNAL. 2006. Vol. 6. No. 3. pp. 631–649.
6. Polyakov S.V., Reznikov B.I. i dr. Linejka indukcionnyh datchikov magnitnogo polya dlya geofizičeskijh issledovanij // Sejsmičeskie pribory. 2016. T. 52. № 1. pp. 5–27.
7. Попов А.П., Чугулев А.О., Винокуров М.Р. Индукционный датчик линейных перемещений с отрицательной обратной связью по потокосцеплению обмотки возбуждения // Вестник ДГТУ. 2012. № 2 (63). вып. 1. pp. 54–59.
8. Tumanski S. Induction coil sensors - a review // Meas. Sci. Technol. 2007. No. 18. pp. 31–46.
9. Towards ultimate low frequency air-core magnetometer sensitivity / Ruben Pellicer-Guridi et al. // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. No. 2269. pp. 1–12.
10. Miznyuk L.Ya. Vhodnye preobrazovateli dlya izmereniya napryazhennosti nizkochastotnyh magnitnyh polej: Kiev: Naukova dumka. 1964. 168 p.
11. Yakimov A.V. Fizika шумов i fluktuacii parametrov: `Elektronnoe uchebnoe posobie / A.V. Yakimov. Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosuniversitet, 2013. 85 p.
12. Zimin E.F., Kochanov `E.S. Izmerenie parametrov `električeskijh i magnitnyh polej v provodyaschijh sredah. M.: `Energoatomizdat, 1985. 256 p.
13. An electromagnetic localization and orientation method based on rotating magnetic dipole/ S. Song et al // IEEE transaction on magnetic. 2013. V. 49, № 3, pp. 1274–1277.



14. Vvedenskij V.L., Ozhogin V.I. Sverhchuvstvitel'naya magnitometriya i biomagnetizm. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. 1986. 200 p.

© Голев И.М., Заенцева Т.И., Никитина Е.А., Бакланов И.О., 2019

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.

Заенцева Татьяна Игоревна, кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры физики и химии, 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.

Никитина Елизавета Андреевна, 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, lis211290@mail.ru.

Бакланов Игорь Олегович, доктор педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой физики и химии, 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, iobaklanov@yandex.ru.