

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.6>

УДК: 621.396.944; 621.396.945; 621.396.949; 52-337

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ЗА СЧЕТ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.Ю. Гришенцев, В.А. Горошков, Р.И. Чернов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»,  
197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2022 г.

**Аннотация.** Произведена разработка системы связи на основе передачи информации за счет магнитной компоненты электромагнитного поля. Выполнен обзор предметной области и предпосылок к созданию системы магнитной связи. Сформулирована цель исследований: разработка системы связи обеспечивающей беспроводной канал передачи информации сквозь толщу проводящей материи. Актуальность исследований обоснована необходимостью обеспечивать беспроводную связь сквозь толщу проводящей среды при ограниченной мощности излучения и локальном действии системы связи. Разработана общая концепция системы связи, а также образующие ее элементы: датчик магнитного поля, магнитный излучатель, метод модуляции, протокол передачи сообщений. Изготовлен опытный образец системы магнитной связи. **Предмет исследования:** беспроводная передача информации за счет магнитной компоненты электромагнитного поля. **Объект исследования:** система передачи информации. **Методология:** комплекс методов и средств разработки элементов и узлов беспроводной связи применительно к системе передачи информации за счет магнитной компоненты электромагнитного поля. **Основной результат:** разработана система беспроводной связи с помощью магнитной компоненты

электромагнитного поля. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть полезны для систем автоматики и телекоммуникаций, организации беспроводной связи сквозь среды со значительным поглощением электромагнитной волны.

**Ключевые слова:** система магнитной связи, магнитное поле, разработка и проектирование.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-0898.

**Автор для переписки:** Алексей Юрьевич Гришенцев, [agrishentsev@yandex.ru](mailto:agrishentsev@yandex.ru)

## Введение

Способность распространения электромагнитной волны в проводящей среде можно оценить с помощью критерия *эквивалентной глубины проникновения* (ЭГП) [1,2] электромагнитной волны:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость вещества,  $\gamma$  – удельная объемная электропроводность вещества. В качестве оценки приведем графики зависимости (рис. 1) ЭГП для: морской воды, меди, алюминия.

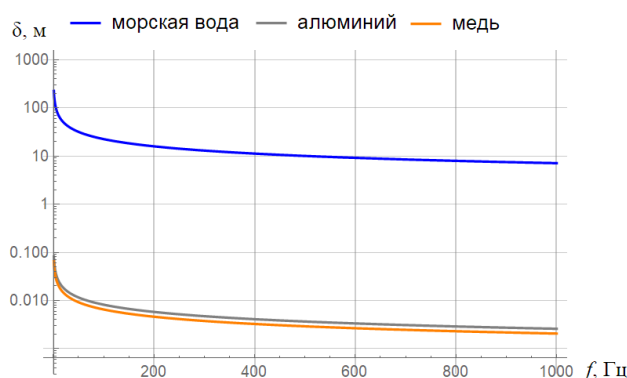


Рис. 1. Зависимость ЭГП электромагнитной волны для: морской воды, меди, алюминия

Причина затухания переменного электромагнитного поля в проводящих средах связана с образованием вихревых токов (токов Фуко) и, как следствие, возникновением противоположно направленных векторов электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{B}$  полей, в соответствии с уравнениями Максвелла (закон индукции Фарадея):

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (2)$$

Анализ уравнения закона индукции Фарадея (2) показывает, что чем быстрее происходит изменение магнитного поля, характеризуемого вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , тем больше ротация электрического поля, что в свою очередь приводит к возникновению вихревых токов Фуко [3,4]. В результате того, что среда не обладает абсолютными проводящими свойствами затухание электромагнитной волны происходит не сразу. Наилучшими свойствами экранирования электромагнитного поля за счет вихревых токов обладают сверхпроводники, удельная проводимость которых стремится к бесконечности.

По графикам (рис. 1) видно, что с повышением частоты электромагнитная волна в проводящих средах достаточно быстро затухает. Так, например, в морской воде на частотах порядка 100 Гц ЭПП составляет около 10 метров. Для алюминия и меди на той же частоте глубина проникновения составляет 8,2 мм и 6,5 мм, соответственно. Еще один фактор экранирования электромагнитного поля, относящийся к магнитной компоненте  $\mathbf{B}$  связан с магнитными свойствами вещества и замыканием магнитных линий по пути с меньшим магнитным сопротивлением. Экранирование электромагнитного поля на макро- и/или микроуровне определяется следующими свойствами среды:

- наличием и подвижностью свободных носителей зарядов, которые образуют вихревые токи, экранирующие внешнее возмущающее электромагнитное поле;

- способностью атомов к коллективному «поведению», в результате чего происходит сложение собственных магнитных моментов, определяющее магнитные свойства среды, в частности магнитную проницаемость.

Построение линий беспроводной связи в условиях, когда приемник и передатчик разделены проводящей средой, необходимо и в некоторых случаях крайне необходимо. Сюда можно отнести задачи, когда использование проводных линий затруднено и/или невозможно, например: получение океанографических данных и связь с подводными плавательными объектами через толщу воды; связь через толщу армированного железобетона; связь с экранированными помещениями (бункерами, сейфами, специальными лабораторными помещениями); и пр.

Традиционный способ организации связи с подводными лодками в условиях, когда часть канала распространения электромагнитной волны проходит через толщу морской воды, является использование следующих категорий частот: от 3 кГц до 30 кГц – очень низкие частоты (ОНЧ); от 300 Гц до 3 кГц – инфранизкие частоты (ИНЧ); от 30 Гц до 300 Гц – сверхнизкие частоты (СНЧ); от 3 Гц до 30 Гц – крайне низкие частоты (КНЧ). Организация низкочастотной связи, когда электромагнитная волна формируется за счет электрического поля, является достаточно дорогим и энергозатратным процессом, причем в масштабах планеты Земля организация такой связи является глобальной, т.к. низкочастотные электромагнитные волны распространяются в естественном «волноводе» образованном поверхностью и ионосферой планеты [5,6]. Такой «глобальный формат» организации связи не всегда уместен и доступен, поэтому определяется цель исследований: разработка системы связи обеспечивающей беспроводной канал передачи информации сквозь толщу проводящей материи.

Задачи исследований:

- разработка концепции приемо-передающей системы;
- разработка высокочувствительного датчика магнитного поля на торсионном подвесе;
- разработка передатчика, выбор и оптимизация с учетом особенностей вида модуляции;

- оценка границ применимости, моделирование, оценка параметров линии связи;
- разработка протокола информационного обмена.

## 1. Разработка концепции приемо-передающей системы

На изображении (рис. 2) содержится блок-схема организационной структуры предлагаемой системы связи за счет магнитной компоненты электромагнитного поля.

Источник передает необходимые сообщения с помощью одного из распространенных протоколов передачи данных/информации, например, по протоколу RS232, RS485, UART и др. [7].

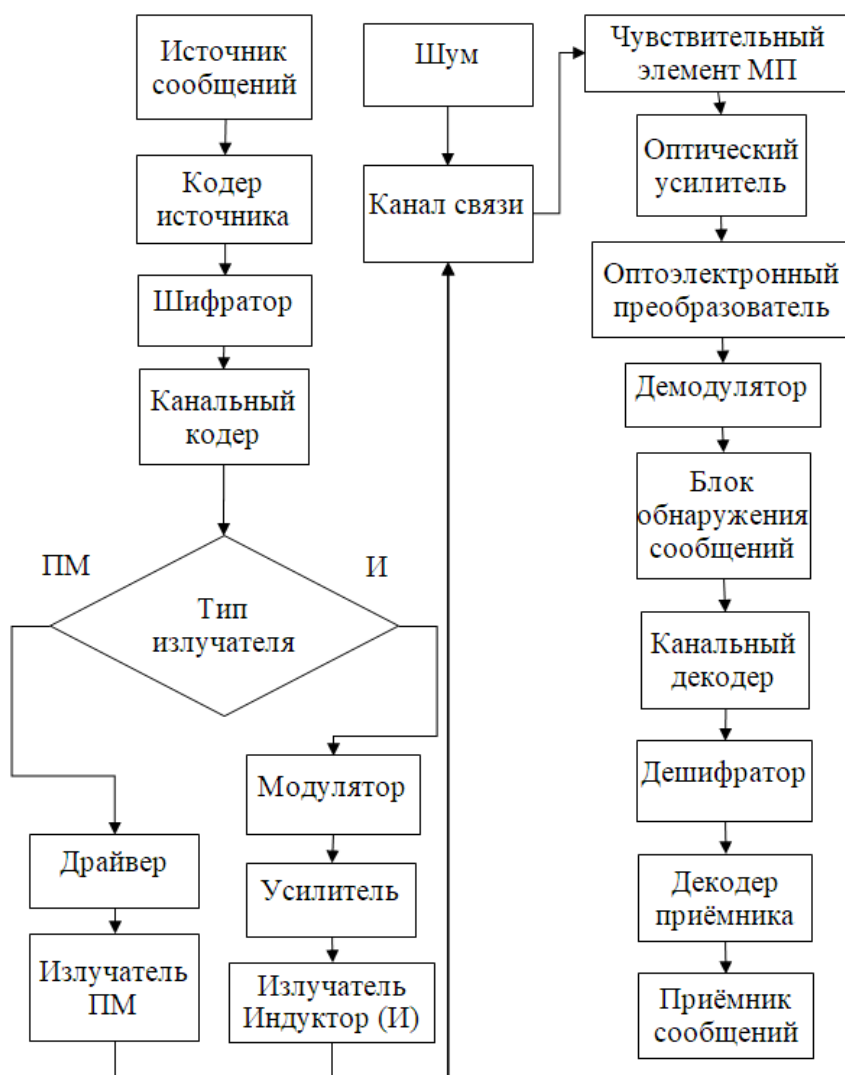


Рис. 2. Блок-схема системы связи на основе передачи информации за счет магнитной компоненты электромагнитного поля

Кодер источника – получает сообщения от источника сообщений и производит их декодирование с преобразованием во внутренний формат данных.

Шифратор – (при необходимости) осуществляет шифрование данных, для повышения информационной защищенности канала связи.

Канальный кодер – осуществляет формирование сообщений в бинарном виде в соответствии с протоколом передачи данных. В том числе может обеспечивать: сжатие информации, помехоустойчивое кодирование, добавление «хеш-сумм». Канальный кодер осуществляет задание несущей частоты модуляции магнитного поля, что в свою очередь определяет глубину проникновения магнитной волны в проводящую среду.

После канального кодера происходит выбор способа излучения магнитной волны: с помощью электромагнитного индуктора или с помощью поворота шаговым двигателем постоянного магнита.

Драйвер – модуль управления шаговым двигателем в соответствии с бинарным сообщением, полученным от канального кодера.

Излучатель на постоянном магните (ПМ) – шаговый двигатель с закрепленным на валу постоянным магнитом или электромеханический излучатель.

Модулятор – производит преобразование бинарной последовательности полученной от канального кодера в сигналы, используемые для передачи сообщений.

Усилитель – усиливает сигнал, полученный от модулятора, до необходимой мощности питания излучателя (индуктора).

Излучатель – соленоид с сердечником.

Канал связи – среда распространения магнитной волны. К полезному сигналу в канале связи добавляется шум.

Чувствительный элемент МП – чувствительный элемент магнитного поля (МП), выполнен в виде магнита с зеркальной поверхностью, закрепленного на торсионном подвесе.

Оптический усилитель – система, образованная лазерным излучателем и системой зеркал, увеличивающих длину хода отраженного луча от зеркальной поверхности чувствительного элемента до фоточувствительной линейки.

Оптоэлектронный преобразователь – фоточувствительная линейка, осуществляющая регистрацию положения лазерного луча отраженного от зеркальной поверхности чувствительного элемента датчика магнитно поля.

Демодулятор – устройство, осуществляющее функцию преобразования сигнала от оптоэлектронного преобразователя в битовую последовательность.

Блок обнаружения сообщений – обнаруживает сообщения в соответствии с протоколом передачи данных в битовой последовательности, поступающей от демодулятора.

Канальный декодер – осуществляет канальное декодирование, т.е. извлекает полезные данные из принятых сообщений, выявляет и исправляет ошибки, осуществляет проверку контрольных сумм.

Дешифратор – осуществляет дешифрацию в случае, если данные зашифрованы.

Декодер приемника – осуществляет подготовку данных для вручения приемнику сообщений, т.е. преобразует данные в один из стандартных протоколов и форматов.

Анализ блок-схемы системы связи на основе передачи информации за счет магнитной компоненты электромагнитного поля позволяет определить ключевые элементы разработки:

- магнитооптический датчик магнитного поля (МОДМП), включающий: чувствительный элемент МП, оптический усилитель, оптоэлектронный преобразователь;
- индукционный передатчик магнитного поля и излучатель на постоянном магните;
- способ модуляции, кодирования и формат данных.

## 2. Разработка датчика магнитного поля

На изображении (рис. 3) показана оптомеханическая часть МОДМП, разработка конструкции и моделирование которого подробно изложены в работе [8].

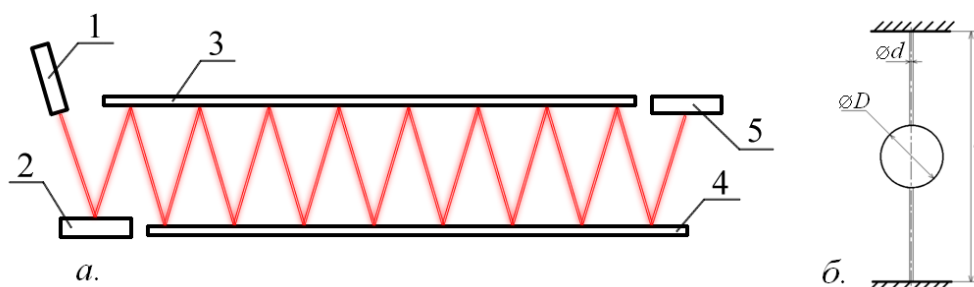


Рис. 3. а. – Схематическое изображение оптомеханической части МОДМП, на схеме обозначены: 1 – полупроводниковый источник лазерного излучения; 2 – чувствительный элемент (магнит на торсионном подвесе); 3, 4 – зеркала; 5 – фотоприемная линейка; б – торсионный подвес магнита

В произведенных исследованиях [8] предложены методы повышения скорости успокоения собственных колебаний системы, образованных магнитом на торсионном подвесе. Результаты моделирования и анализа показывают, что для успокоения собственных колебаний магнита на торсионном подвесе наиболее целесообразно использовать воздушный или магнитоиндукционный успокоитель. Причем магнитоиндукционный успокоитель, по мнению авторов, имеет преимущество, т.к. позволяет не увеличивать массогабаритные параметры подвижной системы (магнита на торсионном подвесе) и предоставляет возможность регулировки магнитоиндукционного коэффициента затухания, не затрагивая непосредственно торсионный подвес.

В работе [8] получена математическая модель МОДМП:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + P \frac{d\varphi}{dt} + kG\varphi = [p_m \times B], \quad (3)$$

где  $J$  – момент инерции магнита;  $\varphi$  – угол поворота чувствительного элемента датчика (магнита);  $t$  – время;  $\frac{d^2 \varphi}{dt^2}$  – вектор углового ускорения;  $P$  – коэффициент успокоения системы;  $\frac{d\varphi}{dt}$  – вектор угловой скорости;  $G$  – коэффициент кручения нити (модуль кручения нити);  $k$  – единичный вектор момента силы



противодействия нити, направление которого выбирается в зависимости от направления закручивания нити;  $\mathbf{p}_m$  – вектор магнитного момента;  $\mathbf{B}$  – вектор индукции внешнего магнитного поля.

Оценка чувствительности датчика производится следующим образом. Длина лазерного луча (рис. 3а.) от излучателя до фотоприемной линейки составляет  $S$ , тогда перемещение по матрице, в зависимости от величины угла  $\varphi$  поворота чувствительного элемента датчика, будет:  $\Delta = S \cos(\varphi)$ . Положим, что минимальное смещение  $\Delta_{min}$ , необходимо для регистрации поворота чувствительного элемента, составляет величину  $\Delta_{min} = \frac{1}{2} \varepsilon \cos(\gamma)$ , то есть половину расстояния  $\varepsilon$  между центрами соседних чувствительных элементов фото линейки,  $\gamma$  – угол движения лазерного луча по фотоприемной линейке относительно ее осевой линии (рис. 4). Тогда минимальный регистрируемый угол  $\varphi$  смещения поворота чувствительного элемента датчика выражается как:

$$\varphi_{min} = \arccos\left(\frac{\varepsilon \cos(\gamma)}{2S}\right). \quad (4)$$

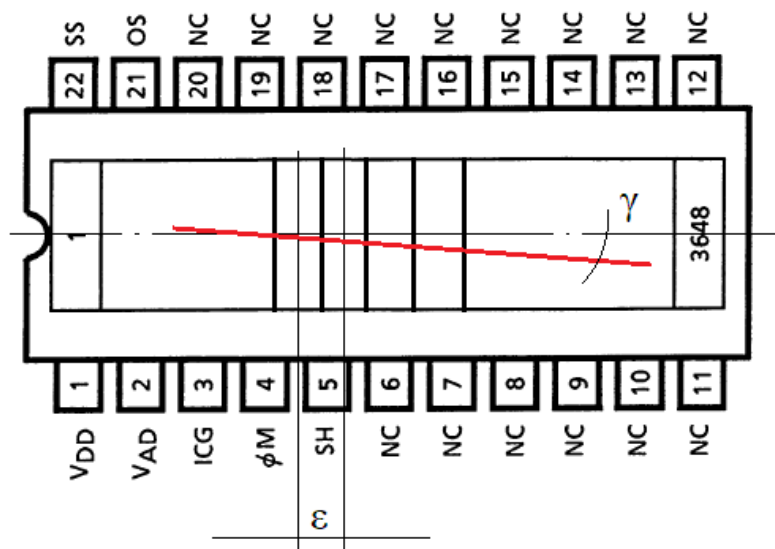


Рис. 4. Фотоприемная линейка, на эскизе обозначены:  $\varepsilon$  – расстояние между центрами соседних чувствительных элементов;  $\gamma$  – угол движения лазерного луча по фотоприемной линейке относительно ее осевой линии; подписаны обозначения выводов микросхемы

Совместное решение (3,4) с учетом параметров элементов и узлов частного конструктива магнитооптической системы позволяет оценить чувствительность

датчика. Так, например, для фоточувствительной линейки TCD1304DG [9] производства фирмы Toshiba, содержащей 3648 фотоэлементов (пикселей) с линейными размерами 8 мкм на 200 мкм, заполнением 100% и расстоянием между центрами пикселей 8 мкм, величина  $\epsilon=8$  мкм.

Результаты математического моделирования (3) показывают, а натурные эксперименты подтверждают, что разработанный МОДМП эффективно производит регистрацию переменного магнитного поля с частотой до 15–20 Гц имеющего напряженность порядка 0,1–0,5 мкТл, что составляет, примерно, сотые доли от естественного магнитного поля Земли<sup>1</sup> на поверхности. Следует отметить, что приведенные данные не являются предельными. Чувствительность датчика можно существенно повысить за счет увеличения хода лазерного луча, пространственного разрешения фотолинейки, в том числе, за счет дополнительной цифровой обработки считываемых с фотолинейки данных. Увеличение частотного диапазона возможно за счет миниатюризации чувствительного элемента и снижения его инерционных свойств. При этом, как было показано ранее, увеличение частоты магнитного поля способствует уменьшению его проникновения в проводящие среды, поэтому для реализуемой системы передачи информации возможность регистрации магнитных сигналов на частоте до 15–20 Гц достаточна.

### **3. Передатчик магнитного поля, индукционный излучатель**

Индукционный излучатель выполнен в форме соленоида с сердечником, другой вид излучателя – электромеханический, выполнен в виде постоянного магнита, закрепленного на оси шагового электродвигателя.

Оценить индукцию магнитного поля постоянного магнита и электромагнита, можно с помощью закона Био-Савара-Лапласа (5), заменив магниты излучателей одновитковой катушкой с током, обеспечивающим эквивалентную индукцию на торцах. Такая замена подходит и для оценки

---

<sup>1</sup> Естественное магнитное поле Земли на поверхности варьируется в пределах от 25 до 65 мкТл [Geomagnetism Frequently Asked Questions <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml>]

чувствительности датчика магнитного поля [8]. Запишем уравнение выражающее приращение вектора магнитной индукции  $d\mathbf{B}$ , обусловленное протеканием тока  $I$ , через участок проводника  $d\mathbf{l}$ :

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{[d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{r^3}, \quad (5)$$

где  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $r$  – радиус-вектор, проведенный из участка проводника  $d\mathbf{l}$  в данную точку пространства (рис. 5).

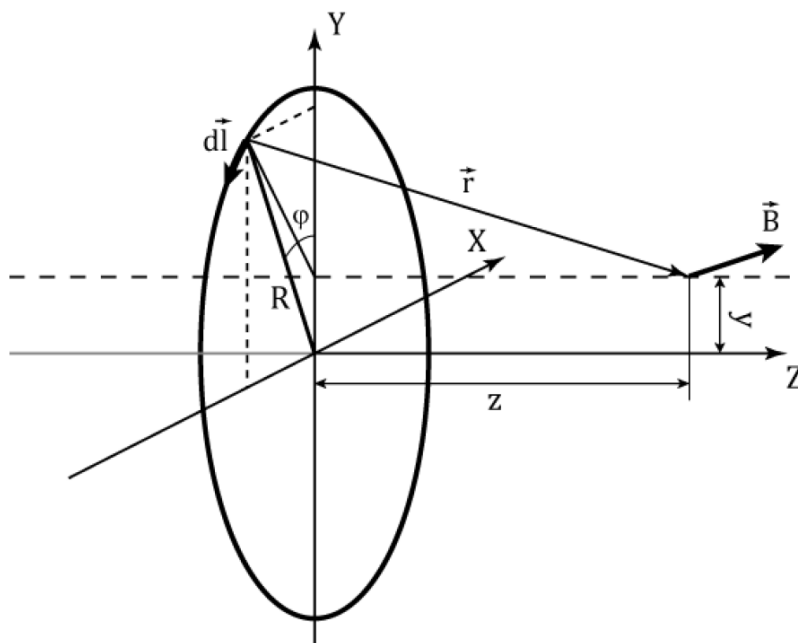


Рис. 5. Единичный виток в прямоугольной системе координат Oxyz [10]

Для численного моделирования и расчета компонент вектора магнитной индукции будем использовать систему уравнений (6), предложенную в работе [10]:

$$\begin{cases} B_x(x, y, z) = -\frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin(\varphi)}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cos(\varphi))^{3/2}} d\varphi \\ B_y(x, y, z) = \frac{\mu_0 IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\varphi)}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cos(\varphi))^{3/2}} d\varphi, \\ B_z(x, y, z) = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R - y \cos(\varphi)}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cos(\varphi))^{3/2}} d\varphi \end{cases}, \quad (6)$$

где использованные в выражении (6) обозначения согласованы с использованными на изображении (рис. 5).

Результаты моделирования в MatLab [11] распределения модуля вектора магнитной индукции по осям Oy и Oz приведен на изображении (рис. 6), для витка радиусом  $R=0,0382$  м. Данные отображены в относительном виде и

выражены в дБ  $20 \lg \left( \frac{B}{\max(B)} \right)$ . Из графиков (рис. 6) видно, что модуль магнитного поля на расстоянии примерно  $2R$ , по оси  $Oy$  имеет меньшие значения, чем по оси  $Oz$ . Далее, с ростом расстояния от центра витка, подобное отношение сохраняется.

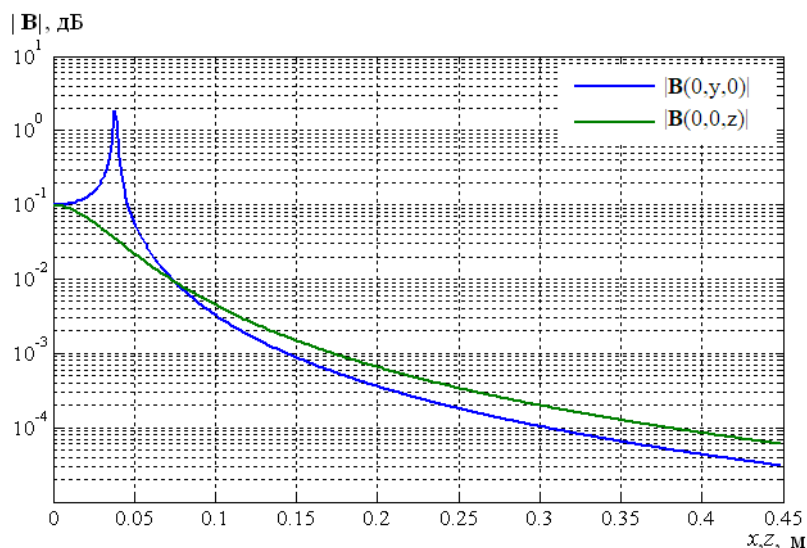


Рис. 6. Распределение модуля вектора магнитной индукции по осям  $Oy$  и  $Oz$

Для оценки дальней зоной для магнитного излучателя, модулируемого единичным витком, построим график отношения  $\frac{|B(0,y,0)|}{|B(0,0,z)|}$  (рис.7). Учитывая, что рассматриваемая магнитная система сохраняет конфигурацию поля при ее масштабировании, по графику (рис. 7) видно, что дальней зоной можно считать расстояния превосходящие  $4R$  от центра единичного витка.

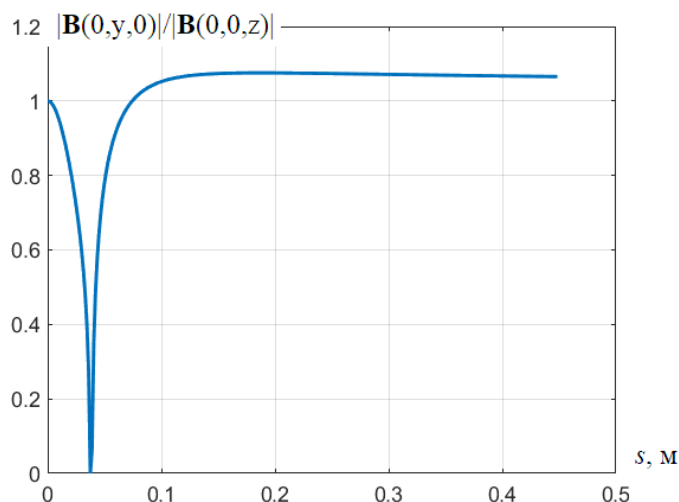


Рис. 7. Отношение  $\frac{|B(0,y,0)|}{|B(0,0,z)|}$ , для оценки дальней зоны, при  $R = 0.0382$  м

Общая картина модуля магнитной индукции в плоскости  $Oyz$  для единичного витка приведена на изображении ниже (рис. 8).

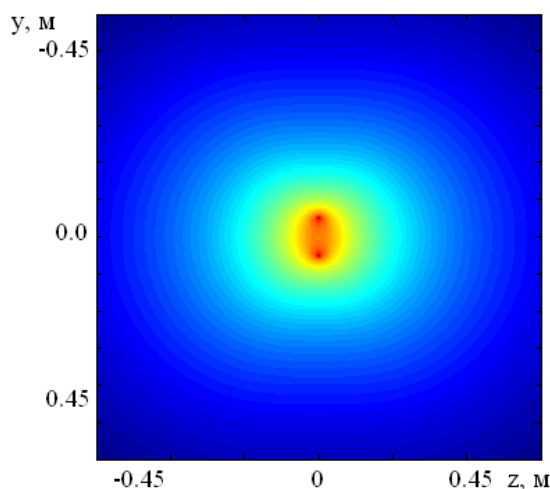


Рис. 8. Модуль магнитной индукции в плоскости  $Oyz$  для единичного витка

Учитывая, что в разрабатываемой системе связи чувствительный элемент датчика является постоянным магнитом, при анализе диаграммы направленности излучателя необходимо учитывать только вектор магнитной индукции, в отличие от традиционных диаграмм направленности, в которых учитывается вектор напряженности электрического поля [12-14].

Диаграмма направленности магнитного излучателя в дальней зоне ( $100R$ ) построена по нормированному модулю вектора магнитной индукции, приведена на изображении ниже (рис. 9).

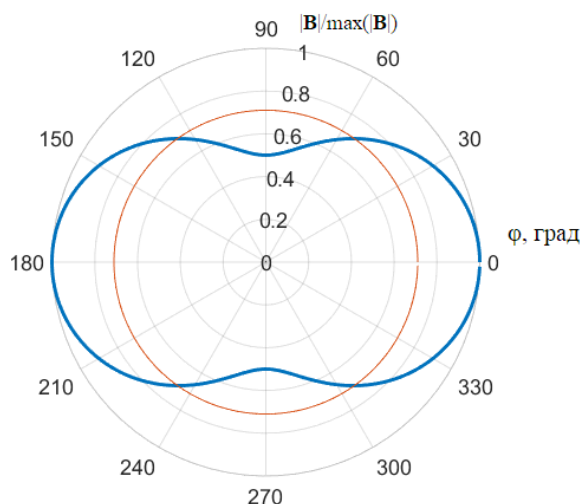


Рис. 9. Диаграмма направленности магнитного излучателя в дальней зоне ( $100R$ ), построена по нормированному модулю вектора магнитной индукции, красной линией обозначен уровень ослабления в 0,71 раз ( $-3$  дБ)

#### 4. Способ манипуляции, кодирования и формат данных

При выборе способа манипуляции предъявлялись следующие требования и рекомендации:

1. с учетом крайне низкой частоты передачи сообщений необходимо выбрать такой вид манипуляции, который обеспечит высокую информационную плотность манипулированного сообщения;

2. желательно, использовать такой вид манипуляции, который сможет работать без явной синхронизации, а лучше всего такой, который сможет работать при некотором изменении несущей частоты;

3. при выборе вида манипуляции сигнала необходимо учесть конструктивные особенности приемного устройства для снижения вероятности ошибки при приеме сообщений.

В результате анализа видов манипуляции, с учетом требований и рекомендаций, был выбран наиболее подходящий вид – бинарная фазовая манипуляция (БФМ) [15], задаваемый выражением:

$$x(t) = \begin{cases} A_{max} \sin\left(2\pi f\left(t - \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right)\right), s[n] = 1 \\ -A_{max} \sin\left(2\pi f\left(t - \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor T\right)\right), s[n] = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – несущая частота,  $n = 1 \dots N$  – индекс дискретного сообщения  $s[n]$  выдаваемого каналным кодером;  $T$  – длительность одного сигнального символа;  $A_{max}$  – амплитуда сигнального символа. На рис. 10 приведен пример БФМ дискретного сообщения  $s[n]$ , модулированного при помощи (7).

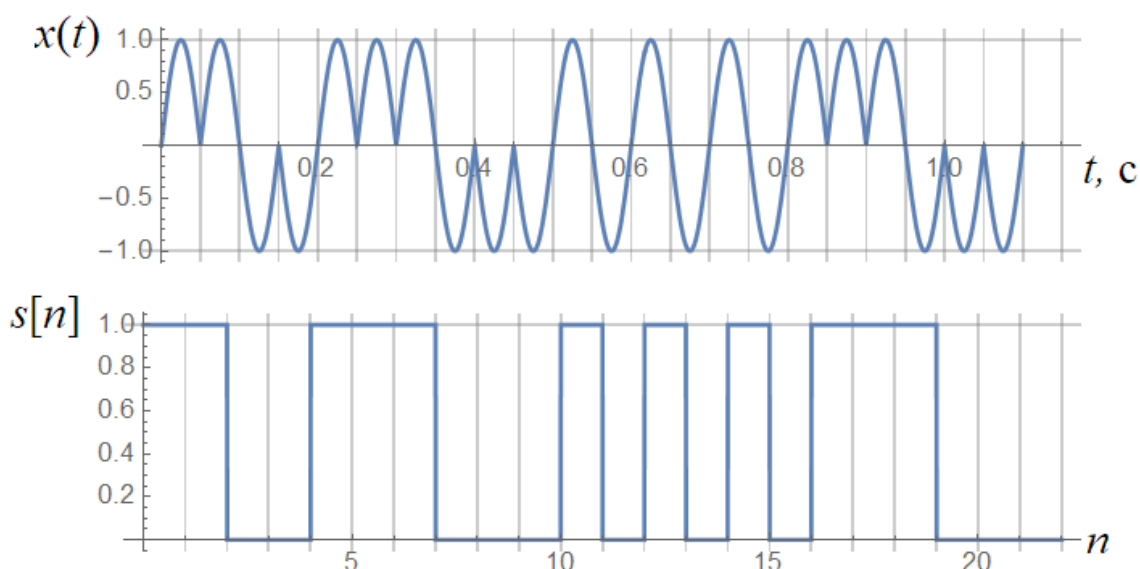


Рис. 10. График  $x(t)$  – БФМ дискретного сообщения  $s[n]$

Из графика (рис. 10) несложно заметить, что:

– при данном виде БФМ, сигналы являются противоположными, т.е. их

евклидова дистанция  $d(x_1, x_2) = 2\sqrt{E}$ , где  $E = \int_0^T x(t)^2 dt$  – энергия сигнала;

– длительность одного символа  $T$  соответствует половине волны гармонической функции основной частоты манипуляции.

Как известно, противоположные сигналы имеют максимальную дистанцию  $2\sqrt{E}$ , при сравнении с другими сигналами с равными энергиями. Полуволновой период манипуляции одного символа позволяет получить высокие скоростные показатели канала связи по критерию максимальной пропускной способности канала:  $2FT_M \log\left(\frac{P_s}{P_N} + 1\right)$ , где  $F$  – полоса частот, занимаемая сообщением;  $T_M$  – длительность сообщения;  $\frac{P_s}{P_N}$  – отношение сигнал/шум.

Произведем оценку спектральных характеристик сигнала  $x(t)$ . По графику (рис. 11) очевидно, что гармонические компоненты сигнала  $x(t)$  достаточно быстро затухают. Статистический анализ, на примере перебора всевозможных БФМ дискретных сообщений  $s[n]$ , общим числом  $2^{10}$ , показывает, что эффективность использования ресурса частота-время, при выбранном виде

манипуляции, близка к единице, по уровню  $-3$  дБ оценки полосы частот, занимаемой сигналом  $x(t)$ .

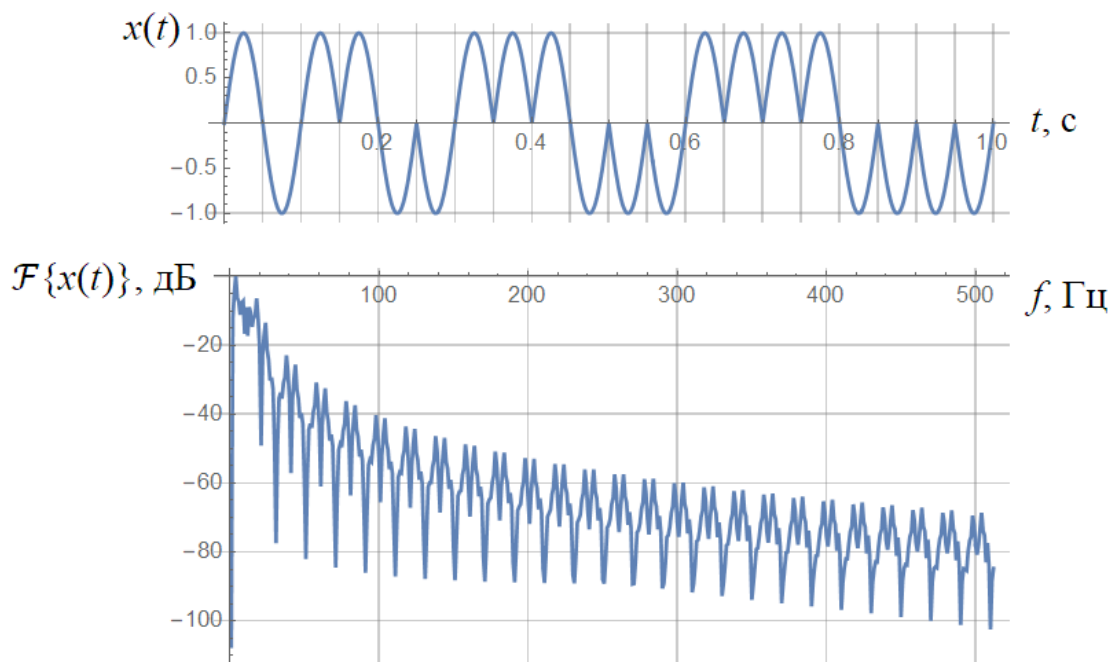


Рис. 11. Сигнал  $x(t)$  и его преобразование Фурье  $F\{x(t)\}$

Существенным положительным свойством выбранной манипуляции является наличие нулевого уровня сигнала при всевозможных межсимвольных переходах  $\{0 \rightarrow 0, 0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0, 1 \rightarrow 1\}$ . Такая особенность определяет возвращение чувствительного элемента датчика (рис. 3) в нейтральное положение, что, в свою очередь, позволяет полностью отказаться от синхронизации передающей и принимающей стороны, и допускает некоторую флуктуацию несущей частоты, что особенно полезно при использовании в качестве передатчика электромеханического излучателя.

Для передачи сообщений предлагается использовать следующий протокол (таблица 1).

Таблица 1. Протокол передачи сообщений

Наименование	Признак начала сообщения				Число бит данных и контрольных бит сообщения	Контрольные биты данных по коду Хэмминга (хеш)	Данные
Число бит	4				8	0...8	0...247
Значения	1	1	0	0	0...255	0...255	0 ... $2^{247}$



Таким образом, длина сообщений варьируется от 12 бит до 267 бит. При использовании несущей частоты 10 Гц, время отправки минимального сообщения составит 0,5 с, а сообщение длиной 267 бит будет отправлено за 13 с. Наличие четырех стартовых бит позволяют приемнику перейти из режима ожидания в режим детектирования, при этом форма стартовых битов выбрана таким образом, что бы снизить вероятность принятия случайного шума за начало сообщения. Поле числа битов данных сообщения позволяет повысить надежность канала связи, в том числе при нестабильной частоте передачи сообщений и длительности передачи сигнального символа. Проверочные биты данных позволяют выявлять и исправлять ошибки при приеме сообщений, частные параметры исправлений зависят от конкретной реализации кода Хэмминга [16]. Поле «Данные» заполняется содержательной частью сообщений и имеет размер от 0 до 247 бит. Таким образом, при использовании несущей частоты манипуляции 20 Гц, скорость передачи сообщения составит 40 бит/сек, при этом максимальная скорость передачи содержательной части сообщения составит 37 бит/с.

## 5. Канал связи, вероятность ошибки при передаче сообщений

При отправке манипулированного сообщения  $x(t)$ , на приемник поступит сигнал  $y(t) = x(t) + g(t) + n(t)$ , где  $g(t)$  – квазистационарная аддитивная компонента естественного магнитного поля Земли [17];  $n(t)$  – аддитивная компонента белого шума с нормальным распределением, нулевым средним и дисперсией  $\sigma^2 = \frac{1}{2} N_0$ .

Постоянная геомагнитная компонента  $g(t)$  компенсируется угловым положением датчика (рис. 3) или вычитанием постоянного смещения (т.е. значения нейтрального положения) из данных, принятых с фотополоски.

Как было показано ранее, выбранный вид манипуляции БФМ обеспечивает передачу сообщений за счет двухсимвольного противоположного алфавита. Как известно из [18,19], вероятность ошибки при таком виде манипуляции составляет:

$$P_{err} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (8)$$

где  $\frac{E_b}{N_0}$  – отношение сигнал/шум на бит;  $Q(z) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – выражение для вычисления площади под Гауссовой функцией плотности вероятностей (рис. 12).

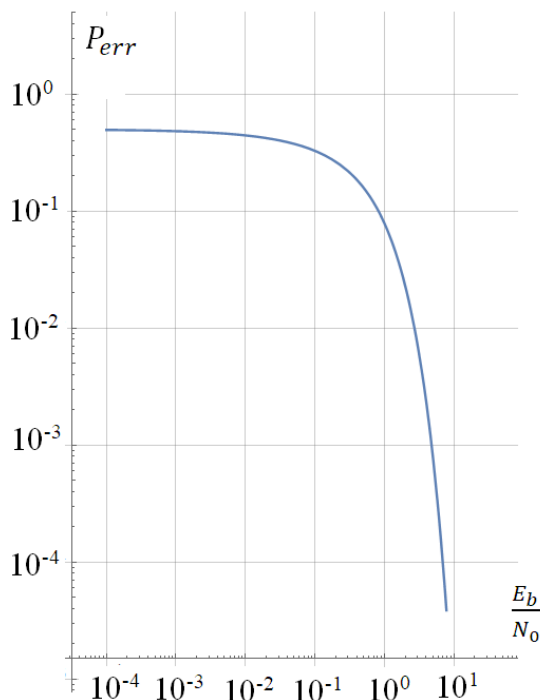


Рис. 12. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум на бит по (8)

## 6. Лабораторный стенд

В соответствии с изложенными выше принципами, изготовлен действующий образец системы связи за счет магнитной компоненты электромагнитного поля (рис. 13, 14).

На фотографии (рис. 13) представлена передающая часть. Индукционный излучатель, выполненный на двух катушках с общим сердечником, рассчитан на эксплуатацию при температурах от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+90^{\circ}\text{C}$  обеспечивает длительную работу при токах до 6 А, число витков каждой катушки 600.

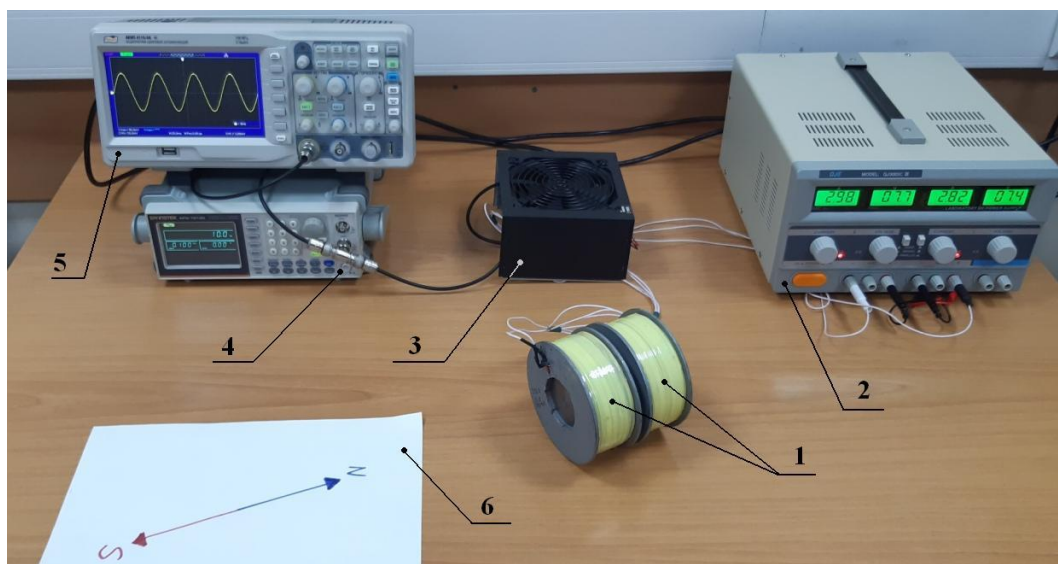


Рис. 13. Лабораторный стенд, передающая часть, на фотографии обозначены: 1 – сдвоенный индукционный излучатель; 2 – блок питания; 3 – усилитель; 4 – программируемый генератор сигналов; 5 – осциллограф; 6 – направление линий магнитного поля Земли

Принимающая часть (рис. 14) – датчик-детектор магнитных сигналов в пластиковом корпусе имеет выход питания и выход преобразованных данных с АЦП оптического фотоприемника.

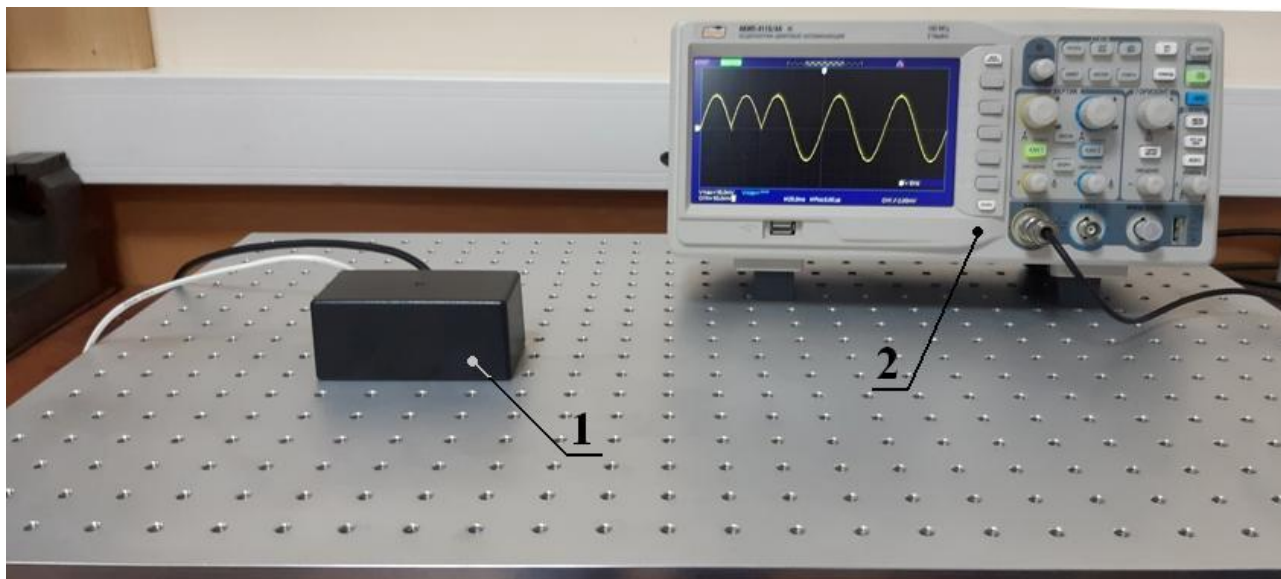


Рис. 14. Лабораторный стенд, принимающая часть, на фотографии обозначены: 1 – датчик-детектор магнитных сигналов; 2 – осциллограф

## Заключение

Произведена разработка системы связи, обеспечивающей беспроводной канал передачи информации сквозь толщу проводящей материи. Решены

поставленные задачи: разработана концепция приемо-передающей системы магнитной связи и реализующих реальное устройство элементов и узлов. Изготовлен действующий опытный экземпляр устройства, проводятся экспериментальные исследования возможностей и границ применимости.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-0898

### Литература

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. *Теоретические основы электротехники*. 4-е изд. Санкт-Петербург, Питер. 2006. Т.3. 377 с.
2. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. *Расчет индуктивностей*. Справочная книга. Ленинград, Энергоатомиздат. 1986. 488 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика. Т.VIII. Электродинамика сплошных сред*. 4-е изд. Москва, Физматлит. 2005. 656 с.
4. Иродов И.Е. *Электромагнетизм. Основные законы*. 5-е изд. Москва, Бином, Лаборатория знаний. 2006. 319 с.
5. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. *Распространение радиоволн*. Москва, ЛЕНАНД. 2009. 496 с.
6. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. *Распространение радиоволн и работа радиолиний*. Москва, Связь. 1971. 440 с.
7. Болл Стюарт Р. *Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров*. Москва, И.Д. «Додэка-XXI». 2007. 360 с.
8. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г., Горошков В.А., Чернов Р.И., Тихомиров А.В., Козин О.В. Разработка и моделирование магнитооптического датчика градиента магнитного поля с торсионным подвесом чувствительного элемента. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.4>

9. CCD Linear Image Sensor TCD1304DG [web] *Toshiba electronic devices & storage corporation*. Дата обращения: 27.10.2022. URL: <https://toshiba.semicon-storage.com/eu/semiconductor/product/linear-image-sensors/detail.TCD1304DG.html>
10. Перов Н.С., Грановский С.А., Стрелков Н.В., Шапаева Т.Б., Макарова Л.А., Шапаев Б.А. *Изучение постоянного магнитного поля. Численное моделирование и эксперимент*. Москва, изд-во: МГУ. 2017. 23 с.
11. MatLab [web] *The MathWorks, Inc.* Дата обращения: 27.10.2022. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
12. Ротхаммель К., Кришке А. *Энциклопедия антенн*. Москва, ДМК Пресс. 2016. 812 с.
13. Захаров В.З., Левчук П.Ф., Муравьев Ю.К., Слюсарев П.В., Серков В.П., Спиридонова М.В. *Характеристики антенн для радиосвязи*. Ленинград, Типография ВКАС. 1967. 130 с.
14. Бобков А.М. *Магнитное поле. Магнитные приемные антенны*. Санкт-Петербург, ООО «КСИ-Принт». 2019. 256 с.
15. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*. 2-е изд. Москва, ООО «И.Д. Вильямс». 2017. 1100 с.
16. Полонников Р.И. *Основные концепции общей теории информации*. Санкт-Петербург, Наука. 2006. 204 с.
17. World Magnetic Model 2020 Calculator [web] *Geomagnetism British Geological Survey*. Дата обращения: 27.10.2022. URL: [http://www.geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/models\\_compass/wmm\\_calc.html](http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html)
18. Голдсмит А. *Беспроводные коммуникации*. Москва, Техносфера. 2011. 904 с.
19. Прокис Дж. *Цифровая связь*. Москва, Радио и связь. 2000. 800 с.

**Для цитирования:**

Гришенцев А.Ю., Горошков В.А., Чернов Р.И. Разработка системы связи на основе передачи информации за счет магнитной компоненты электромагнитного поля. *Журнал радиоэлектроники* [Электронный журнал]. 2023. №1 <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.1.6>