

## СЕКЦИЯ 6.

### Технологии гражданского судостроения и военного кораблестроения

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-137-141

УДК 621.396+621.372.512.3

EDN: BFTZVM

М.Ю. Костин<sup>1</sup>, А.Ф. Ягудин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО «НПМП «Элмет», Уфа, Россия

## О ВЫБОРЕ КОНФИГУРАЦИИ И МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СВЯЗИ

Статья посвящена выбору параметров приемно-излучающих антенн для систем магнитной связи подводных аппаратов. Авторами приводятся преимущества использования магнитной связи по сравнению с другими видами связи. На основе приведенных математических расчетов значений напряженности и магнитной индукции обосновывается выбор оптимальной конфигурации и материала используемых антенн. Также, исходя из оценки требуемых для излучения напряжений и токов, делается вывод о необходимости использования резонансного контура, состоящего из приемно-излучающей антенны и конденсатора. При рассмотрении выбранного резонансного контура с антенной в режиме приема были рассчитаны значения входного сигнала для разных расстояний. По итогам анализа при выбранных параметрах антенн возможно получить входной сигнал, достаточный для построения надежной системы магнитной связи подводных аппаратов.

**Ключевые слова:** подводный аппарат, ближнеполевая магнитная связь, магнитная антенна, магнитное поле.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

## SECTION 6.

### Commercial and naval shipbuilding technologies

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-137-141

UDC 621.396+621.372.512.3

EDN: BFTZVM

M.Yu. Kostin<sup>1</sup>, A.F. Yagudin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC Concern «Sea Underwater Weapons-Gidropribor», St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>OOO R&PE Elmet, Ufa, Russia

## ON SELECTION OF CONFIGURATIONS AND MAGNETIC MATERIALS FOR TRANSMIT/RECEIVE ANTENNAS OF NEAR-FIELD MAGNETIC COMMUNICATION

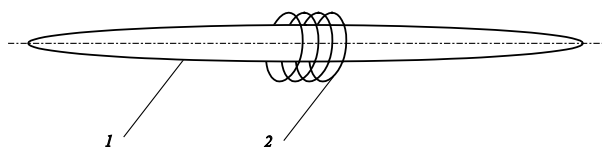
The paper focuses on selection of characteristics for transceiver antennas intended for magnetic communication systems of submarines. The authors describe advantages of magnetic communication as compared to other types of communication. Mathematical calculations of magnetic intensity and flux density are used to validate the optimal configuration and material for the antennas. Based on the estimated voltages and currents required for radiation it is concluded that a resonance circuit is necessary, consisting of a transceiver antenna and a capacitor. When the selected resonance circuit with the antenna was considered, the input signal for different distances in the receiving mode was calculated. With the selected antenna parameters, according to the analysis, it is possible to obtain a sufficient output signal for building up reliable magnetic communication system of submarines.

**Keywords:** submersible, near-field magnetic communication, magnetic antenna, magnetic field.

*The authors declare no conflicts of interest.*

*Для цитирования:* Костин М.Ю., Ягудин А.Ф. О выборе конфигурации и магнитных материалов для приемно-передающих антенн ближнеполевой магнитной связи. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; Специальный выпуск 1: 137–141.

*For citations:* Kostin M.Yu., Yagudin A.F. On selection of configurations and magnetic materials for transmit/receive antennas of near-field magnetic communication. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; Special Issue 1: 137–141 (in Russian).



**Рис. 1.** Магнитная антенна: 1 – магнитный сердечник; 2 – катушка

**Fig. 1.** Magnetic antenna: 1 – magnetic core; 2 – coil

## Введение

### Introduction

Системы стационарной и подвижной ближнеполюсной магнитной связи в последнее время снова привлекли внимание для осуществления различных систем коммутации (вода – вода, воздух – вода, земля – вода и земля – воздух) из-за необходимости построения быстродействующих помехозащищенных каналов и сетей. Развитию данных систем также способствует совершенствование электронной элементной базы и методов кодирования информации [1–3]. Магнитная связь обладает рядом существенных преимуществ перед электромагнитной или акустической связью, а именно:

- пренебрежимо малой задержкой распространения сигнала связи;
- временной и пространственной стабильностью параметров канала связи;
- достаточно широкой пропускной способностью канала связи;
- малыми шумами канала связи;
- трудностями в создании искусственных помех.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно применять магнитную связь для оперативного обмена информацией между стационарными и подвижными подводными аппаратами. При этом дальность связи и пропускная способность магнитного канала во многом определяются напряженностью магнитного поля передатчика сообщений и чувствительностью приемника, а также полосой пропускаемых частот. Однако ввиду ограниченных габаритов подводных аппаратов размеры антенн и источников питания также являются ограниченными. Это означает, что увеличение дальности связи только за счет энергетического повышения напряженности магнитного поля ограничивается в основном конструкцией подводного аппарата. В связи с этим возникает задача повышения эффективности ближнеполюсной магнитной связи за счет поиска оптимальной конфигурации и магнитных материалов для построения приемо-передающих антенн подводных аппаратов.

## Выбор конфигурации и материала магнитной антенны

### Selection of magnetic antenna configuration and material

В силу вышесказанного удобно использовать одну антенну как для приема, так и для передачи информации. Рассмотрим приемо-передающую антенну в режиме излучения, схематично представленную на рис. 1.

Антенна состоит из магнитного сердечника 1 и катушки 2. Магнитный сердечник имеет конфигурацию эллипсоида вращения с большим отношением длин главных полуосей с целью снижения размагничивающего фактора. Выбор данной конфигурации основан на том обстоятельстве, что при помещении антенны в однородное магнитное поле внутреннее магнитное поле в сердечнике также будет однородным независимо от величины угла между вектором магнитного поля и осью эллипсоида [4].

Ввиду того, что для получения наибольшей эффективности необходимо, чтобы все магнитные силовые линии поля проходили через катушку, последняя должна иметь как можно меньшую длину и располагаться посередине магнитного сердечника.

В предположении, что в катушке 2, имеющей  $n$  витков, длину  $l$  и радиус  $a$ , протекает ток  $I$ , а также учитывая, что магнитное поле сосредоточено внутри сердечника, можно записать значение напряженности магнитного поля  $H$  внутри катушки, рассматривая ее как длинный соленоид:

$$H = \frac{I \cdot n}{l}. \quad (1)$$

Тогда значение магнитной индукции  $B$  внутри сердечника составит

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot n}{l}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника антенны,  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

Наибольшая величина магнитной индукции внутри сердечника определяется индукцией его насыщения и для аморфных магнитных материалов доходит до 1,4...1,5 Тл [5], что значительно превышает индукцию насыщения ферритов и позволяет увеличить дальность связи. Ввиду этого целесообразно для изготовления магнитных антенн использовать аморфные материалы.

Найдем допускаемое значение величины электрического тока в катушке. Оценим это значение, предполагая, что  $B = 1,4$  Тл,  $\mu = 4000$ ,  $l = 0,05$  м,  $a = 0,02$  м. Тогда произведение тока на число витков равно:

$$I \cdot n = \frac{B \cdot l}{\mu \cdot \mu_0} = 13,9 \text{ А.} \quad (3)$$

Запишем индуктивность  $L$  магнитной антенны (мГн):

$$L = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot S}{l} = 0,126 \cdot n^2, \quad (4)$$

где  $S = \pi \cdot a^2$  – площадь поперечного сечения катушки.

Напряжение  $U$  на катушке (В) при рабочей частоте антенны  $f = 50$  кГц определяется законом электромагнитной индукции:

$$U = 2\pi \cdot f \cdot B \cdot n \cdot S = 522 \cdot n. \quad (5)$$

Как можно видеть из формул (3) и (5), для обеспечения связи необходимо наличие высоких значений напряжений и токов, что трудно реализуемо для подводных аппаратов с автономными источниками питания. Поэтому в системе связи предлагается использовать резонансный контур, образованный магнитной антенной и конденсатором, как показано на эквивалентной электрической схеме ближнепольной магнитной связи на рис. 2.

Левый контур представляет собой антенну  $L$  в режиме излучения, соединенную параллельно с конденсатором  $C$ . Резистор  $R$  моделирует потери в магнитной антенне. Правый контур представляет собой антенну  $L$  в режиме приема, соединенную с конденсатором  $C$  аналогично левому контуру.

Рассчитаем требуемую емкость конденсатора, используя формулу резонансного контура:

$$f_p = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}. \quad (6)$$

Примем резонансную частоту равной рабочей частоте антенны  $f_p = f$ , тогда требуемая емкость конденсатора (нФ):

$$C = \frac{80,15}{n^2}. \quad (7)$$

Полагая среднюю добротность резонансного контура равной  $Q = 50$ , а также используя формулу (3), получим мощность (Вт), необходимую для создания требуемого магнитного поля:

$$P = \frac{I^2 \cdot Q}{2\pi \cdot f \cdot L} = \frac{244,2}{n^4}. \quad (8)$$

Поскольку необходимая мощность уменьшается пропорционально четвертой степени витков, даже при небольшом их числе затрачиваемая на излучение мощность получается малой.

Представляя магнитную антенну как магнитный диполь, запишем радиальную  $H_D$  и тангенциальную  $H_\theta$ , составляющие напряженности магнитного поля на расстоянии  $D$  и при азимутальном угле  $\theta$  [4]:

$$H_D = \frac{B_c \cdot a^3 \cdot \cos(\theta)}{\mu_0 \cdot D^3}, \quad (9)$$

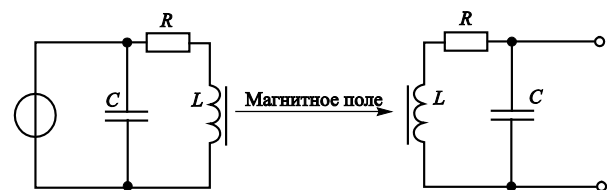
$$H_\theta = \frac{B_c \cdot a^3 \cdot \sin(\theta)}{2 \cdot \mu_0 \cdot D^3}, \quad (10)$$

где  $B_c$  – значение магнитной индукции в сердечнике передающей антенны.

Таким образом, напряженность магнитного поля уменьшается пропорционально третьей степени расстояния, то есть является ближнепольным. При этом наибольшее значение напряженности магнитного поля получается на оси магнитной антенны подводного аппарата.

Рассмотрим приемно-излучающую антенну в режиме приема. Магнитная индукция в сердечнике приемной антенны при соосном расположении антенн ( $\cos(\theta) = 1$ ) составляет величину

$$B = \frac{\mu \cdot B_c \cdot a^3 \cdot \cos(\theta)}{D^3}. \quad (11)$$



**Рис. 2.** Эквивалентная электрическая схема ближнепольной магнитной связи

**Fig. 2.** Equivalent electric circuit of near-field magnetic communication

**Таблица 1.** Значения входного сигнала при различных условиях

**Table 1.** Input signal values in various conditions

$D, \text{ м}$ $n$ , ВИТКОВ	100	300	500
3	2,6 мВ	98,3 мкВ	21,2 мкВ
5	4,4 мВ	163,8 мкВ	35,4 мкВ
7	6,2 мВ	229,3 мкВ	49,5 мкВ

Резонансное напряжение электрического тока составляет величину

$$U = 2\pi \cdot f \cdot S \cdot n \cdot B \cdot Q = \frac{2\pi^2 \cdot f \cdot \mu \cdot n \cdot B_c \cdot a^5 \cdot \cos(\theta)}{D^3} \quad (12)$$

Как видно из формулы (12), напряжение, развиваемое в приемной антенне, пропорционально добротности при прочих постоянных значениях. При указанных выше величинах получим напряжение – значение входного сигнала:

$$U = \frac{884,5 \cdot n}{D^3} \quad (13)$$

Зависимость (13) в логарифмическом масштабе для числа витков катушки  $n = 5$  представлена на рис. 3.

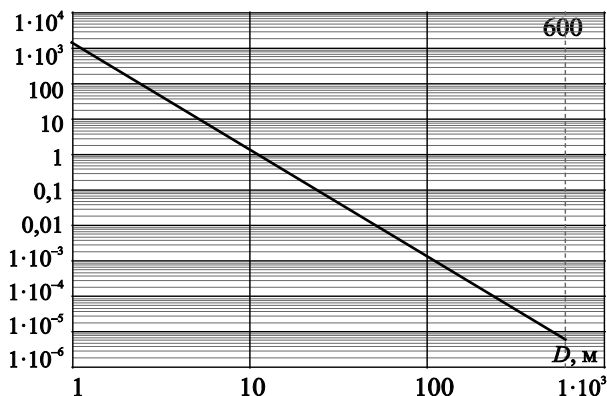
Используя формулу (13), представим в таблице значения входного сигнала при различных условиях.

Из таблицы видно следующее: напряжение на антенне в режиме приема достигает десятков – сотен мкВ, что позволяет обеспечить надежную связь между подводными аппаратами. При этом стоит сделать немаловажное замечание: данные параметры не учитывают проводимость среды и справедливы для воздушного пространства или дистиллированной воды.

## Выводы

### Conclusion

1. В подводных аппаратах целесообразно использовать магнитную приемо-передающую



**Рис. 3.** Зависимость входного сигнала от расстояния

**Fig. 3.** Input signal versus distance

антенну, магнитный сердечник которой выполнен в виде эллипсоида вращения с большим отношением длин главных полуосей, что позволяет обеспечить наличие однородного магнитного поля в сердечнике.

2. Материал сердечника, выполненный из аморфных материалов, позволяет получить большие значения магнитного поля.
3. Для снижения энергетических затрат в антеннах целесообразно использовать резонансный контур, образованный антенной и конденсатором.
4. При использовании рассмотренных магнитных антенн возможно получить входной сигнал, достаточный для построения надежной системы магнитной связи (по воздушному пространству или в дистиллированной воде).

## Список использованной литературы

1. Власов А.А., Родионов А.Ю. Перспективы использования систем подводной коммуникации на основе магнитной индукции (обзор) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 2(47). С. 36–49. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-5.
2. A survey of underwater magnetic induction communications: fundamental issues, recent advances, and challenges / Y. Li, S. Wang, C. Jin [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, No. 3. P. 2466–2487. DOI: 10.1109/COMST.2019.2897610.
3. Передатчики ближнепольных магнитных систем связи / А.Н. Бабицкий, Б.А. Беляев, Н.М. Боев, Р.Г.

- Галеев // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 12. С. 111–115.*
4. *Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник. 10-е изд., стереотип. Москва : Гардарики, 2003. 316, [2] с.*
  5. *Кекало И.Б. Аморфные магнитные материалы: Курс лекций. Москва : МИСиС, 2001. 276 с.*
  4. *Bessonov L.A. Theoretical fundamentals of electric engineering, Electromagnetic field. Hand book. 10<sup>th</sup> edition, stereotype, Moscow: Gardariki, 2003. 317 p. (in Russian).*
  5. *Kekalo I.B. Amorphous magnetic materials: Lecture course. Moscow: MISIS, 2001. 276 p. (in Russian)*

#### References

1. *Vlasov A.A. Prospects for application of underwater communication systems based on magnetic flux density (review)/ A.A. Vlasov, A.Yu. Radionov // Engineering School Herald of Far-Eastern Federal University. 2021. No. 2(47). P. 36–49. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-5 (in Russian).*
2. *A survey of underwater magnetic induction communications: fundamental issues, recent advances, and challenges / Y. Li, S. Wang, C. Jin [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21, No. 3. P. 2466–2487. DOI: 10.1109/COMST.2019.2897610.*
3. *Transmitters of near-field magnetic communication systems/A.N. Babitskiy, B.A. Belyaev, N.M. Boev, R.G. Galeev// Progress of modern radio-electronics. 2017. No. 12. P. 111–115 (in Russian).*

#### Сведения об авторах

*Костин Максим Юрьевич*, инженер 1-й категории АО «Концерн «МПО – Гидроприбор». Адрес: 194044, Россия, Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., д. 24а, лит. 3. E-mail: maxinkost@gmail.com.

*Ягудин Анвар Фаридович*, к.т.н., директор ООО «НПМП «Элмет». Адрес: 450071, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Менделеева, д. 203. E-mail: a110263f@yandex.ru.

#### About the authors

*Maxim Yu. Kostin*, Engineer 1<sup>st</sup> category Concern „Sea Underwater Weapons-Gidropribor“, Address: B. Sampsonievsky pr. 24a, letter 3, 194044, St. Petersburg, Russia. E-mail: maxinkost@gmail.com.

*Anvar F. Yagudin*, Cand. Sc. (Tech), Director of R&PE Elmet. Address: ul. Mendeleeva 203, 450071, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia. E-mail: a110263f@yandex.ru.

Поступила / Received: 05.07.23  
Принята в печать / Accepted: 27.07.23  
© Костин М.Ю., Ягудин А.Ф., 2023