

DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.6

УДК 621.3.029.53

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕРРИТОВОЙ МАГНИТНОЙ АНТЕННЫ

И. Б. Широков, М. А. Дурманов, И. В. Скорик

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности,  
299053, Севастополь, ул. Университетская, д. 33

Статья поступила в редакцию 24 марта 2020 г.

**Аннотация.** Рассмотрены основные принципы исследований ближней зоны электромагнитного поля, излучаемого рамочной антенной. В работе показано, что для системы из двух катушек в выбранном диапазоне длин волн можно считать ближнюю зону индукционной, т.е. рассматривать в ней процесс распространения поля с точки зрения изменения напряженности переменного магнитного поля. Произведен расчет изменения ЭДС индукции, создаваемой переменным магнитным полем, в зависимости от расстояния и выполнены экспериментальные исследования, которые подтвердили результаты теоретических расчетов.

**Ключевые слова:** ближняя зона излучения, ферритовая магнитная антенна, электродвижущая сила индукции, переменное магнитное поле.

**Abstract.** The common characteristics of the long-wave range radio signals and their high penetrating ability at propagation through the rock mass are provided, which stipulates their use for underground radio communications. The problem statement is given, which shows that at a distance from the source less than  $\lambda/2\pi$ , where  $\lambda$  is the wavelength of the signal emitted (near radiation zone), the electromagnetic field can be considered as quasistatic and the field calculation can be conducted as for stationary fields. A system of two magnetic coils with ferrite cores is considered. The system generates an alternating magnetic field and further the field is received at the receiving point. The coaxial arrangement of coils is considered for theoretical research. The expression for EMF induction and the induction current dependence of the distance in coaxially placed coils is obtained. The expression shows that EMF

induction decreases in inverse proportionality to the cube of the distance. The expression has all the parameters independent of the distance combined into a single proportionality coefficient characterizing the specific system. The obtained result shows the dependence of EMF induction and the induction current induced in the receiving circuit from the parameters of coils. The influence of a ferrite core on the magnetic field that is generated and received by coils with ferrite cores is considered and analyzed. However, the maximum current induced in the receiving coil is determined not only by the design and electrical parameters of the coils, but also by their relative placement. The experiment is dedicated to the study of the effect. Prototypes of the transmitting and receiving devices operating at a frequency of 128 kHz were used for the experiment. The receiving signal level dependence on the distance between the transmitting and receiving devices in the range from 5 to 60 meters with coaxial and parallel mutual positioning of the coils where the coils are at the same level in same plane was experimentally studied. The experimental results are compared with the theoretical dependence by plotting dependencies in single coordinate system and their close correlation is shown. The results of the studies are useful to solve problems such as search of people trapped under the rubble in the mines. Knowing the nature of the change in the field created by the beacon, the level of the received radio signal can determine the distance to the transmitter, and thus locate the search object that has the beacon.

**Key words:** near radiation zone, ferrite magnetic antenna, induction electromagnetic force, alternating magnetic field.

## **Введение**

На сегодняшний день радиосигналы длинноволнового диапазона применяется в ионосферной связи для передачи сигналов на расстояния порядка 100-1000 км. В этом диапазоне радиоволн для всех видов земной поверхности токи проводимости существенно преобладают над токами смещения, благодаря чему при распространении поверхностной волны происходит лишь незначительное поглощение энергии. Длинные волны хорошо

дифрагируют вокруг сферической поверхности Земли. Оба эти фактора обуславливают возможность распространения длинных и сверхдлинных волн земной волной на расстояние до 3000 км. Кроме этого ДВ могут использоваться для связи с погруженными подводными лодками и для подземной радиосвязи, так как эти волны имеют способность проникать в глубину моря и горных пород на десятки метров. Достоинством ДВ является то, что они не испытывают чрезмерного поглощения энергии ЭМП проводящим слоем пород.

Работы, связанные с исследованием затухания электромагнитного поля (ЭМП) в ближней зоне излучения сигналов длинноволнового (ДВ) диапазона, не достаточно подробно описаны в литературе. Это связано с тем, что в ближней зоне электромагнитная волна только формируется, в процессе чего происходит множество нестационарных процессов.

Таким образом, исследования излучения ДВ в ближней зоне могут быть использованы в решении задачи радиосвязи в местах, где имеются проблемы с распространением радиоволн. Например, в шахтах, где существует вероятность обвалов горных пород, использование радиопередающих устройств низкочастотного диапазона поможет осуществить оперативный поиск пострадавших в результате чрезвычайной ситуации. Зная структуру и характер изменения поля ближней зоны, а также измеряя напряженность поля в данной точке пространства, можно определить расстояние до источника излучения. Максимальные дальности обнаружения объектов, как правило, составляют не более 100 м, что является достижимым при имеющихся возможностях передающего и приемного устройств.

Целью работы является исследование затухания поля в ближней зоне излучения для решения задачи поиска людей под завалами горных пород.

## **1. Постановка задачи**

Рассмотрим основные свойства электромагнитных колебаний длинноволнового диапазона, которые проявляются в ближней зоне. Как уже говорилось, структура поля в ближней зоне достаточно сложна, так как в ней существует так называемое связанное нестационарное ЭМП. То есть в ближней

зоне присутствуют высокий уровень электрической и магнитной составляющей и диаграмма направленности антенны не может быть определена. В ближней зоне, или в зоне индукции, на расстоянии от источника меньше  $\lambda/2\pi$ , где  $\lambda$  — длина волны излучаемого сигнала, ЭМП можно считать квазистатическим. Это поле убывает обратно пропорционально кубу расстояния. В ближней зоне излучения электромагнитная волна еще не сформирована. Для характеристики ЭМП измерения напряженности переменного электрического поля  $\mathbf{E}$  и переменного магнитного поля  $\mathbf{H}$  производятся отдельно [1].

В данной работе рассмотрен подход, позволяющий определить изменение магнитной составляющей напряженности ЭМП в ближней зоне. Для этой цели используется система двух антенных катушек с ферритовыми сердечниками. Анализ этой системы позволит аналитически и экспериментально определить характер изменения напряженности магнитного поля от расстояния.

## 2. Расчет затухания магнитного поля

Система из двух антенных катушек с ферритовыми сердечниками (приемной и передающей) позволит создавать переменное магнитное поле и регистрировать его в точке приема.

Будем считать, что принятый или наведенный сигнал в приемной катушке (контуре) является результатом действия исключительно магнитных сил, возникающих в результате взаимной индукции между катушками антенн. Согласно закону электромагнитной индукции этот сигнал численно равен индукционному току, протекающему под действием ЭДС самоиндукции, возникающей в приемной катушке. Измеряя индукционный ток в приемном контуре, можно судить о дальности до излучающего объекта. Исходя из этого, задача данной работы состоит в определении зависимости уровня наведенной ЭДС (или индукционного тока) в приемной катушке от расстояния до объекта поиска и анализе этой зависимости.

Рассмотрим случай соосного расположения приемной и передающей катушек находящихся в одной плоскости. В этом случае магнитное поле, создаваемое передающей катушкой, наилучшим образом воздействует на

приемную, вызывая с ней наибольшую ЭДС самоиндукции. Это объясняется тем, что сердечник, находящийся внутри катушки играет роль «антенны», усиливая магнитное поле в направлении оси катушки. В этом случае, направление вектора магнитной индукции поля, создаваемого одной катушкой, совпадает с осью второй катушки. Тогда вертикальная составляющая вектора  $\vec{B}$  будет наибольшей, а именно она влияет на возникновение индукционного тока в катушке. Кроме того, для соосного расположения катушек легче произвести расчет магнитного поля, так как оно в этом направлении имеет симметричную структуру.

Для исследования взаимодействия двух магнитных катушек (МК) в качестве источника переменного МП рассмотрим МК, в которой протекает переменный электрический ток  $i_1(t) = I_1 \cos(\omega t)$ , где  $\omega$  — циклическая частота. Этот ток создает переменное МП с магнитной индукцией  $B(t)$ . Переменный магнитный поток  $\Phi(t) = B'(t)S$  этого поля пронизывает контур приемной МК, возбуждая в ней ЭДС индукции  $e(t)$

$$e(t) = -\frac{dB'(t)S}{dt}, \quad (1)$$

которая, в свою очередь, является причиной протекания индукционного тока, равного

$$i_2(t) = \frac{e(t)}{R},$$

где  $B'(t)$  — магнитная индукция в точке приема,  $S$  — площадь контура,  $R$  — сопротивление проводов обмотки катушки.

Необходимо получить выражение, определяющее зависимость ЭДС индукции от расстояния. Воспользуемся законом Био-Савара-Лапласа для определения вектора индукции магнитного поля, порождаемого постоянным электрическим током. Считаем, что переменный ток будет порождать соответствующее переменное магнитное поле.

Согласно этому закону магнитное поле любого тока может быть вычислено как суперпозиция полей, создаваемых отдельными элементарными участками

токов. Индукция магнитного поля, создаваемого участком тока, может быть определена как

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3}, \quad (2)$$

где  $I d\vec{l}$  — элементарный участок тока;  $\vec{r}$  — радиус-вектор (расстояние от элемента тока до точки пространства, в которой определяется индукция магнитного поля).

Согласно принципу суперпозиции индукция  $\vec{B}$  результирующего поля проводника с током равна векторной сумме вкладов  $d\vec{B}$  отдельных элементов  $d\vec{l}$  проводника, то есть рассчитывается с помощью криволинейного интеграла по длине  $l$  проводника

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}.$$

Найдем величину радиус-вектора для случая соосного расположения катушек. Для удобства расчета заменим ток  $N_1$  витков передающей катушки одним витком с током  $i_1(t)N_1$ .

Проинтегрировав выражение (1), получим выражение для магнитной индукции в точке, находящейся на расстоянии  $r$  от передающей катушки

$$B'(t) = \frac{\mu_0 \mu_1 i_1(t) N_1 R_1^2}{2r^3}, \quad (2)$$

где  $R_1$  — радиус витков и  $N_1$  — количество витков в передающей катушке, амплитуда тока, протекающего в катушке  $I_1$ ,  $\mu_1$  — эффективная магнитная проницаемость сердечника. Из выражения (2) видно, что магнитное поле убывает обратно-пропорционально кубу расстояния.

Рассмотрим принимающую катушку поискового устройства. ЭДС индукции, наводимая в этой катушке, может быть вычислена по следующей формуле

$$e(t) = F_A \mu_2 \omega S N_2 B'(t), \quad (3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ ,  $\mu_2$  — эффективная магнитная проницаемость сердечника принимающей катушки,  $\omega$  — частота сигнала,  $S$  — площадь поперечного сечения ее сердечника,  $N_2$  — число витков ее обмотки.

Индуктивность катушки поискового устройства вычисляется по формуле

$$L = K\mu_0\mu_2 \frac{N_2^2 S}{l_r}, \quad (4)$$

где  $l_r$  — длина сердечника. Коэффициенты  $K$ ,  $F_A$  учитывают всякое неидеальное действие ферритового сердечника [2].

Выразим ЭДС индукции через индуктивность  $L$ , подставив правую часть выражения (4) в (3), в результате чего получим

$$e(t) = \frac{F_A}{K} \frac{\omega L B'(t)}{\mu_0 n}, \quad (5)$$

где  $n = \frac{N_2}{l_r}$  — число витков, приходящихся на единицу длины катушки, считая,

что катушка полностью намотана на сердечник.

Подставив выражение (2) в (5), получим итоговое выражение для расчета ЭДС индукции

$$e(t) = \frac{F_A}{K} \frac{\omega L}{n} \frac{\mu_1 i_1(t) N_1 R_1^2}{2r^3}. \quad (6)$$

Выражение для индукционного тока, протекающего в приемной катушке, выглядит следующим образом:

$$i_2(t) = \frac{F_A}{K} \frac{\omega L}{n} \frac{\mu_1 i_1(t) N_1 R_1^2}{2Rr^3}. \quad (7)$$

Данный результат показывает, от каких параметров зависит ЭДС индукции и индукционный ток, наводимый в приемном контуре. В выражениях (6) и (7) все величины, кроме  $r$  являются параметрами передающей и приемной катушек и не зависят от  $r$ . Представим их в виде постоянного коэффициента пропорциональности  $K_{II}$  и запишем выражение зависимости амплитудного значения ЭДС индукции от расстояния в следующем виде

$$E(r) = \frac{K_{II}}{r^3},$$

где  $K_{II} = \frac{F_A}{K} \frac{\omega L}{n} \frac{\mu_1 I_1 N_1 R_1^2}{2}$ .

Для уверенного приема радиосигнала от передающей катушки, который определяется наибольшей наводимой ЭДС индукции в приемной антенне, необходимо добиться максимального коэффициента пропорциональности ( $K_{II} = \max$ ). Для достижения этого необходимо увеличивать частоту колебаний, диаметр и количество витков катушки. Также необходимо увеличивать эффективную магнитную проницаемость сердечника и ток передающей катушки и индуктивность приемной катушки, уменьшая при этом число витков, приходящихся на единицу длины катушки, что наилучшим образом способствует использованию сердечника приемной катушки.

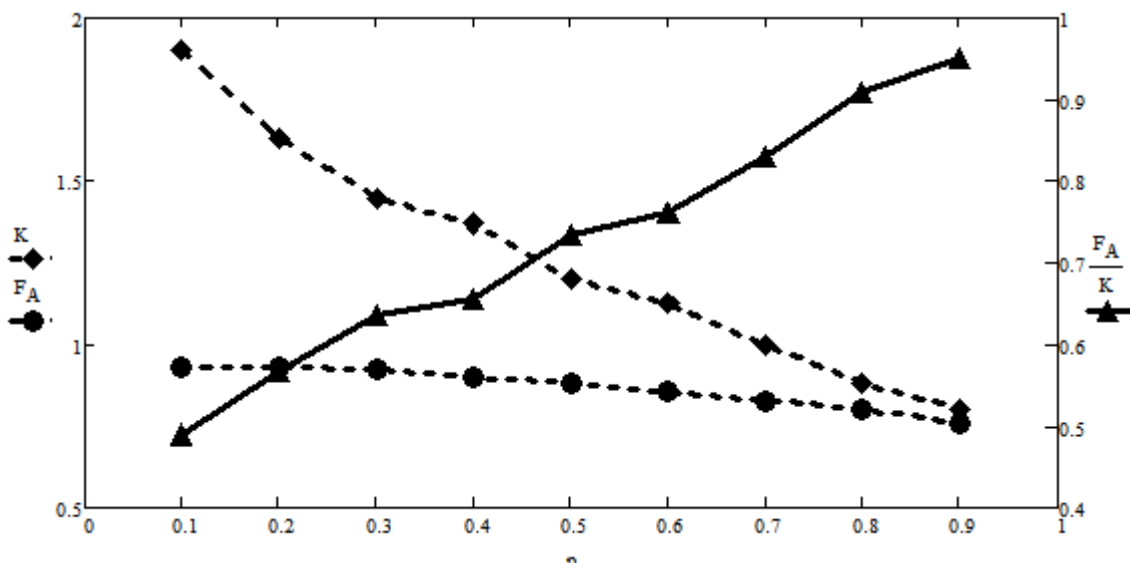


Рис. 1. Графики зависимости  $K$ ,  $F_A$  и  $F_A/K$  от  $l_c/l_r$ .

Рассмотрим отношение величин, характеризующих эффективность использования ферритового сердечника —  $F_A/K$ . Наибольшее значение отношения  $F_A/K$  можно определить по графику, показанному на рис. 1, на котором приведены зависимости величин  $F_A$  и  $K$ , а также их отношения  $F_A/K$  от  $l_c/l_r$  — отношения длины обмотки катушки к длине сердечника.



Из рис. 1 видно, что при наибольшем значении  $l_c/l_r$ , то есть при полной намотке катушки на сердечник, наблюдается максимальное значение отношения  $F_A/K$ .

Увеличение частоты радиосигнала приводит к увеличению ЭДС индукции, согласно выражению (1), но с другой стороны это приводит к уменьшению зоны ближнего поля и зависимость затухания электромагнитного поля от расстояния уже не будет пропорциональна  $1/r^3$ . Вместе с тем будет больше сказываться влияние горных пород на величину затухания электромагнитного поля.

Параметры передающей катушки мы также не можем увеличивать до бесконечности вследствие ограничений электромагнитной совместимости, габаритов антенны и электрического питания устройства. Те же ограничения касаются и приемного устройства.

### 3. Анализ результатов испытаний

Для верификации теоретических исследований были произведены экспериментальные исследования затухания электромагнитного поля в ближней зоне.

Для эксперимента были разработаны прототипы передающего и принимающего устройств, которые работают на частоте 128 кГц. Передающее устройство имеет антенну с ферритовым сердечником, которая создает переменное магнитное поле. Принимающее устройство с помощью антенны с ферритовым сердечником регистрирует это поле, и после преобразования энергии магнитного поля в электрический сигнал, усиливает, детектирует и определяет уровень сигнала, который соответствует ЭДС индукции, наводимой в антенной катушке этого устройства [3]. Далее выводится значение уровня сигнала на индикатор.

Экспериментальным путем была исследована зависимость уровня принимаемого сигнала от расстояния между передающим и принимающим устройством. Расстояния изменялись в диапазоне от 5 до 60 метров. Через каждые 2 метра выбранной дистанции фиксировался уровень принимаемого

сигнала. Измерения уровня сигнала были проведены для двух взаимных положений катушек: соосном —  $U_1$  и параллельном, когда катушки находятся на одном уровне в одной плоскости —  $U_2$ , как показано на рис. 2.

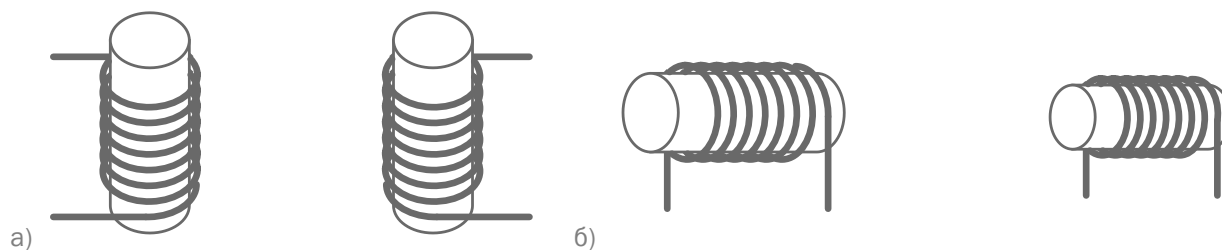


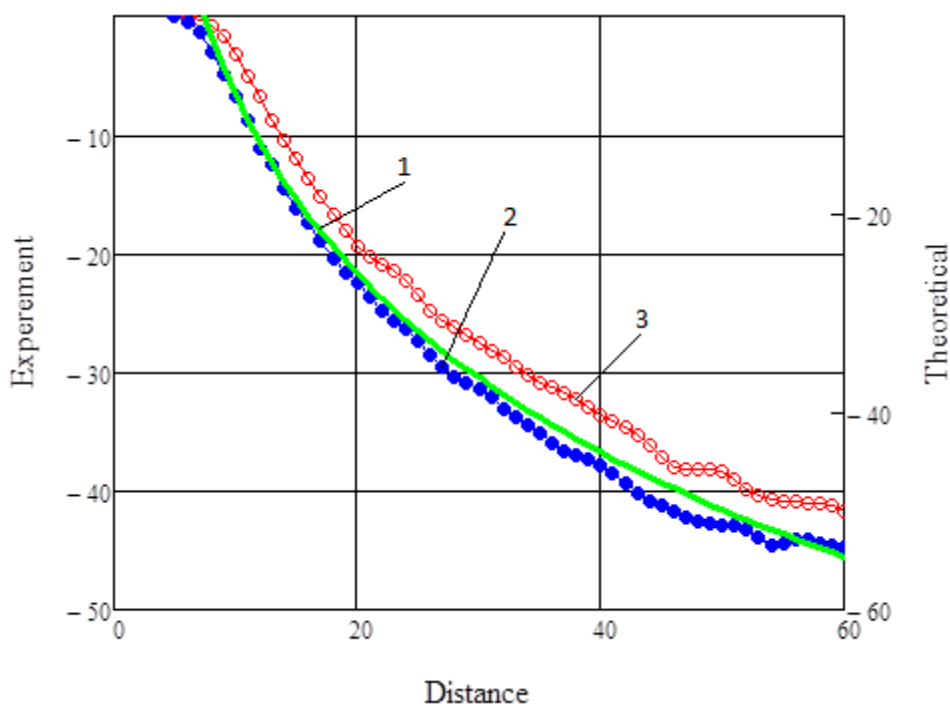
Рис. 2. Два варианта взаимного расположения катушек, при которых достигается прием максимального сигнала.

При данных взаимных положениях катушек путем натуральных исследований были зафиксированы максимальные значения сигнала в приемном контуре. Это объясняется структурой магнитного поля (направлением линий магнитной индукции): при указанных взаимных положениях катушек магнитный поток, создаваемый передающей катушкой, будет наибольшим, так как вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости сечения катушки, а, следовательно, наибольшей будет ЭДС индукции, возникающая в приемной катушке.

Этот факт дает возможность, исследуя затухание поля, определить дальность до источника сигнала амплитудным методом.

Эксперимент был проведен на открытом воздухе и вдали от промышленных объектов. В связи с этим было исключено влияние индустриальных шумов, паразитных полей и других факторов, отрицательно влияющих на точность полученных результатов.

Результаты экспериментальных исследований в виде зависимостей принятого и усиленного сигнала приемным устройством при двух рассмотренных взаимных положениях антенн от расстояния, а также результаты теоретических расчетов в виде теоретической зависимости, построенной согласно выражению (6), показаны на рис. 3.



*1 — теоретическая зависимость; 2 — экспериментальная зависимость при соосном расположении катушек; 3 — экспериментальная зависимость при параллельном расположении катушек на одном уровне в одной плоскости*

Рис. 3. Графики экспериментальных и расчетной зависимостей уровня принимаемого сигнала от расстояния.

Из рисунка 3 видно, что результаты теоретического расчета согласуются с результатами эксперимента. Характер поведения этих кривых имеет вид степенной функции с показателем степени  $-3$ . При малых расстояниях между катушками (менее 5 м) наблюдается эффект компрессии сигнала, вызванный нелинейностью усилителя приемного устройства (ограничение динамического диапазона сверху). При расстояниях больших 40 м наблюдается зона увеличения погрешности определения расстояния, вызванная шумами приемного устройства (ограничение динамического диапазона снизу). И первая и вторая проблема ограничения сигнала может быть решена техническими методами.

## Заключение

Исследования электромагнитного поля в ближней зоне показывают, что структура поля, создаваемого антенной катушкой передатчика, определяется

только напряженностью магнитного поля. Исследовав изменение переменного магнитного поля, был определен характер его затухания путем теоретического расчета и проведения экспериментальных исследований. Их результаты можно считать близкими.

Результаты проведенных исследований могут оказаться полезными для решения таких задач, как поиск людей под завалами в шахтах, а также контроль перемещения сотрудников поисковых служб, которые также могут находиться в опасной зоне [4, 5]. Зная характер изменения поля, создаваемого радиомаяком, можно по уровню принимаемого радиосигнала определить расстояние до передатчика, и таким образом локализовать объект поиска, у которого находится радиомаяк.

### Литература

1. Макаров М.А., Лунева Л.А. Основы электромагнетизма. Физика в техническом университете [Электронный ресурс]. URL: <http://www.samomudr.ru/d/Makarov%20A.M.%20Osnovy%20elektromagnetizmat.pdf> (дата обращения 23.03.2020).
2. Laurent C.H.J. Ferrite Antennas for A.M. Broadcast Receivers, Transactions of the IRE. 1962. Vol. BTR-8. P. 50-59.
3. Широков И.Б., Дурманов М.А. Определение координат объекта поиска при проведении поисково-спасательных мероприятий // «Радиотехника» Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Вып. 153, Харьков: Харьковский национальный университет радиоэлектроники. 2008. С. 33-39.
4. Shirokov I. B., Durmanov M. A., Yaufman A. I. The Approach to a Problem of Search of People under Avalanches // Processing of XXIX General Assembly of the International Union Radio Scientifique Internationale (URSI) : [офиц. сайт]. URL: <http://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/FP1p8.pdf> (дата обращения: 23.03.2020).

5. Широков И.Б., Дурманов М.А., Сербин А.М. Система поиска людей под завалами // Збірник наукових праць. Севастопольський військово-морський інститут ім. П.С. Нахімова. Випуск 1(11). Севастополь: Севастопольський військово-морський інститут ім. П.С. Нахімова. 2007. С. 152-160.

**Для цитирования:**

Широков И.Б., Дурманов М.А., Скорик И.В. Исследование поля ближней зоны излучения ферритовой магнитной антенны. Журнал радиоэлектроники. 2020. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/6/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.6