

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.7>

УДК: 621.3.029.53

## УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ МОДУЛЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

И.Б. Широков, М.А. Дурманов, Е.А. Редькина

Севастопольский государственный университет  
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Статья поступила в редакцию 20 июня 2022 г.

**Аннотация.** В статье разработана структурная схема портативного приемного устройства с микроконтроллерной обработкой параметров принимаемого радиосигнала. Приемное устройство сопряжено с трехкоординатной магнитной антенной, что позволяет принимать магнитное поле по трем пространственным составляющим для измерения амплитуды каждой составляющей магнитного поля. Геометрическая сумма модулей векторов напряженности магнитного поля каждой компоненты дает результирующий модуль вектора напряженности магнитного поля, который позволяет локализовать объект, то есть определить расстояние до него амплитудным методом. Усилители с регулируемым коэффициентом усиления позволяют увеличить амплитуду принимаемого сигнала и поддерживать ее вблизи максимального значения динамического диапазона модуля АЦП, что обеспечивает наиболее точное измерение малых амплитуд сигнала. Представлен алгоритм вычисления квадратного корня из целых значений для расчета результирующего модуля вектора напряженности магнитного поля на базе микроконтроллеров малой вычислительной мощности. Проанализировано влияние общего ферритового сердечника на прием ортогональных компонент напряженности магнитного поля, создаваемого ортогонально расположенными конечными катушками индуктивности.

**Ключевые слова:** алгоритм, магнитное поле, вектор магнитной индукции, трехкоординатная антенна, квадратный корень.

**Автор для переписки:** Широков Игорь Борисович, [shirokov@ieee.org](mailto:shirokov@ieee.org)

## **Введение**

Теория распространения электромагнитных волн в проводящих средах в настоящее время достаточно развита. Можно при этом оценить степень поглощения электромагнитного поля на значительных расстояниях, исчисляемых десятками километров. Однако определить теоретически ослабление поля на расстоянии нескольких десятков метров, что является характерным для организации спасательных мероприятий в угледобывающих шахтах, зачастую не представляется возможным. В этих случаях речь идет о дальности действия системы, исчисляемой малыми долями длины волны электромагнитных колебаний [1].

В статье [2] была рассмотрена приемно-передающая система для определения затухания электромагнитного поля в проводящих средах на различных частотах, где особое внимание было уделено аспектам построения передающей части системы.

В данной статье рассматривается принцип работы приемной части, заключающийся в способе приема радиосигнала сигнала и в способе его обработки.

Для приема радиосигнала предложена трехкоординатная магнитная антенна, конструкция которой описана в патентах [3, 4]. Данная антенна предназначена для отдельного приема трех ортогональных проекций напряженности магнитного поля. Эскиз антенны показан на рис. 1. Такой способ приема позволяет определить местоположение объекта, создающего магнитное поле, вне зависимости от структуры создаваемого им поля, что актуально в системах поиска людей под завалами [5, 6].

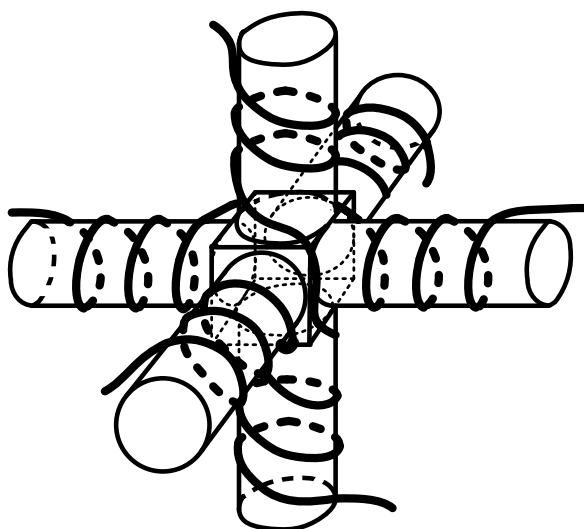


Рис. 1. Внешний вид трехкоординатной магнитной антенны

### 1. Структурная схема приемного устройства

Рассматривается работа приемного устройства в контексте взаимодействия его с передающим устройством, между которыми находится исследуемая среда распространения (образец горной породы или свободное пространство). При проведении испытаний в качестве передающего устройства может использоваться источник низкочастотного переменного магнитного поля, описанный в статьях [7, 8].

Структурная схема приемного устройства показана на рис. 2.

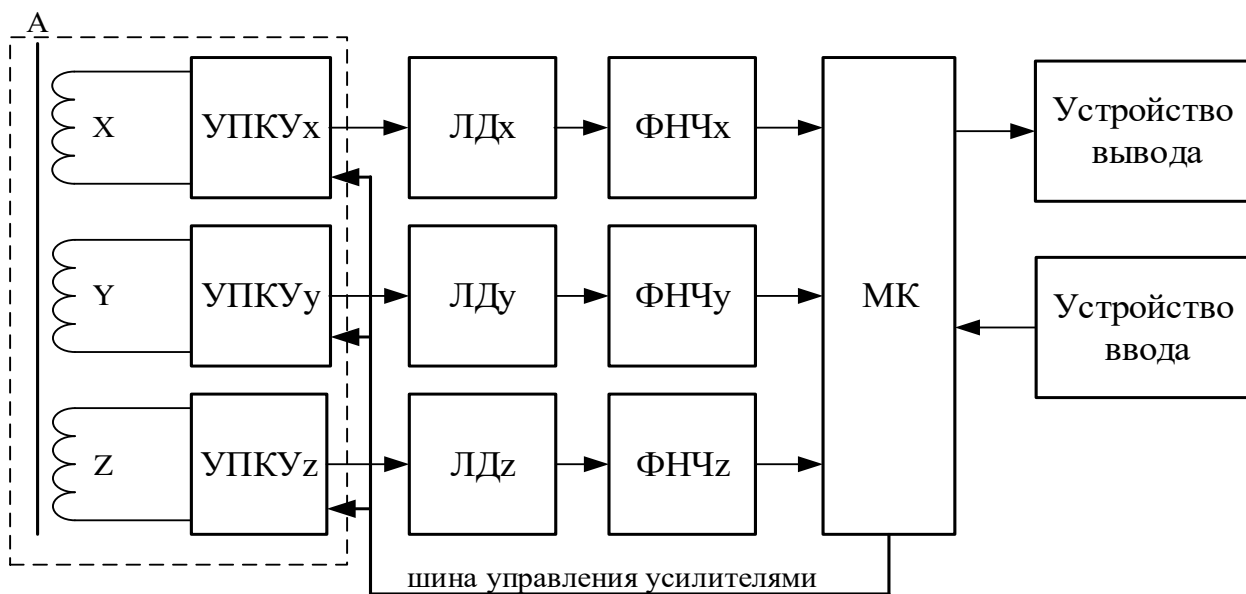


Рис. 2. Структурная схема приемного устройства

Приемное устройство состоит из следующих блоков: трехкоординатная антенна (А), усилители с программируемым коэффициентом усиления (УПКУ) для каждого приемного канала, линейный амплитудный детектор (ЛД), фильтр нижних частот (ФНЧ), микроконтроллерный блок управления и обработки сигналов (МК), устройства ввода и устройство вывода.

Принцип функционирования структурной схемы приемного устройства состоит в следующем. В каждой катушке с ферритовым сердечником X, Y и Z антенны (А) возникает ЭДС индукции, вызываемая внешним переменным магнитным полем, вследствие чего в обмотках катушек протекают электрические токи. Напряжение на выходе катушек усиливается усилителями с управляемыми коэффициентами усиления для поддержания максимального уровня принимаемых сигналов в пределах динамического диапазона модуля аналого-цифрового преобразования, что в свою очередь позволяет получить оцифровывание сигнала с максимальной разрешающей способностью и повысить точность измерений. После усиления сигнал проходит через блоки линейных детекторов (ЛД) и фильтры нижних частот (ФНЧ) для выпрямления переменного напряжения и получения его среднеквадратического значения. Микроконтроллер (МК) в свою очередь осуществляет управление коэффициентами усиления усилителей с программируемым коэффициентом усиления, оцифровыванием сигналов, соответствующим амплитудам ЭДС индукции, возникающим в трех катушках с ферритовыми сердечниками, находящимися в трех ортогональных плоскостях вследствие действия внешнего трехмерного переменного магнитного поля, и обработкой их с целью нахождения результирующего модуля напряженности магнитного поля в данной точке пространства.

## 2. Обработка сигналов и алгоритм вычисления модуля вектора напряженности результирующего магнитного поля

Микроконтроллер осуществляет аналого-цифровое преобразование наводимых в катушках антенны сигналов с учетом их усиления и вычисляет напряженность каждой составляющей магнитного поля по формулам:

$$H_x = K_{\Pi x} E_x;$$

$$H_y = K_{\Pi y} E_y;$$

$$H_z = K_{\Pi z} E_z,$$

где  $E_x$ ,  $E_y$  и  $E_z$  – амплитуды ЭДС индукции, наводимые в каждой из трех катушек с ферритовыми сердечниками;  $K_{\Pi x}$ ,  $K_{\Pi y}$  и  $K_{\Pi z}$  – постоянные коэффициенты пропорциональности, характеризующие катушки с ферритовыми сердечниками, находящимися в ортогональных плоскостях. Для рассматриваемого типа антенны все три катушки с ферритовыми сердечниками идентичны, поэтому  $K_{\Pi x} = K_{\Pi y} = K_{\Pi z} = K_{\Pi}$ .

Также в  $K_{\Pi}$  может быть включена информация об источнике внешнего магнитного поля и о расстоянии до него, тогда путем описываемых измерений и расчетов можно определить параметры среды распространения электромагнитной волны.

Модуль напряженности результирующего магнитного поля в данной точке пространства вычисляется как геометрическая сумма трех составляющих

$$|\vec{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}. \quad (1)$$

Процесс расчетов по формуле (1) должно быть достаточно быстрыми, чтобы обеспечить вычисления в режиме реального времени.

Основная идея алгоритма описывается следующим выражением

$$X = \sqrt{Y} \Rightarrow X^2 = Y. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что нахождение квадратного корня числа  $Y$  возможно через подбор числа  $X$ , возведения его в квадрат и последующего сравнения с числом  $Y$ . Для решения данной задачи удобно использование

двоичной системы счисления, так как это позволит осуществить поиск числа за счет циклического сдвига или изменения/добавления бита в регистре.

Алгоритм может быть реализован для микроконтроллера с  $n$ -разрядной архитектурой для нахождения целочисленного значения корня. При этом алгоритм обеспечивает максимальную точность при минимальном количестве итераций, поскольку не используется метод последовательного инкрементирования значения регистра, что требует значительного времени на вычисление.

### **3. Анализ ошибки измерения напряженности магнитного поля**

Ошибка расчетов также будет определяться неидеальной развязкой между ортогональными компонентами напряженности магнитного поля, формируемыми ортогональными расположенными конечными катушками индуктивности с единым сердечником. При этом на каждой катушке будут наводиться компоненты поля от двух соседних ортогональных катушек.

Минимизацию ошибки от наводимых компонент напряженности магнитного поля можно осуществить калибровкой при теоретическом анализе смежных областей пространства при условии, что только одна катушка индуктивности запитана, как, например, показано на рис. 3, где область  $S_3$  – рабочая область «активной» катушки индуктивности, область  $S_2$  – смежная область, в которой влияние катушек равноправное, и область  $S_1$  – область наводки компонент «активной катушки» на ортогональную катушку.

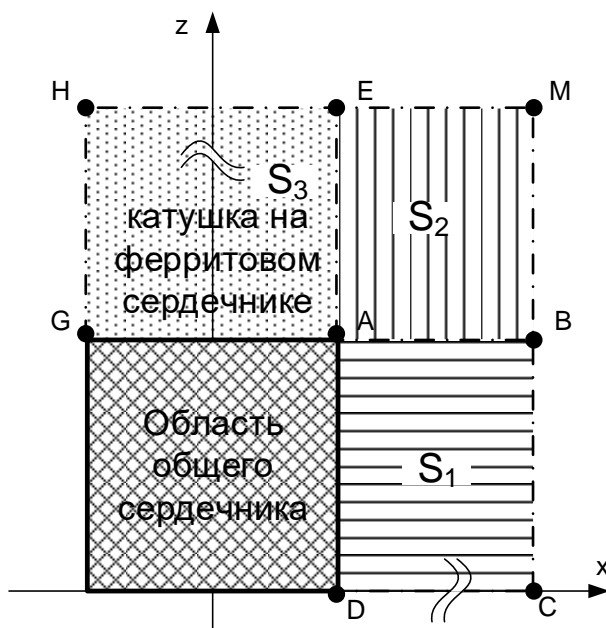


Рис. 3. Диаграмма анализа наводок в ортогональных катушках

Таким образом, коэффициент наводки можно определить из выражения

$$K_{err} = P_{S1} / P_{S3} ,$$

где  $P_{S1} = \frac{1}{S_1} \oint_{S_1} H_{\Sigma} dS_1$  ,  $P_{S3} = \frac{1}{S_3} \oint_{S_3} H_{\Sigma} dS_3$  – интегральные функции от общей

напряженности магнитного поля  $H_{\Sigma} = \sqrt{H_z^2 + H_{\rho}^2}$  в исследуемой области, ограниченной прямоугольниками  $ABCD$  (область  $S_1$ ) и  $AENG$  (область  $S_3$ ) в плоскости  $zOx$  соответственно (благодаря симметрии структуры магнитной антенны по осям, вычисления ошибки от наводок на ортогональные катушки во всей конструкции можно свести к расчету в указанной на рис. 3 области).

Из конфигурации сердечника видно, что максимальное взаимное влияние составляющих магнитного поля будут иметь место около соединительного куба. Оценим это влияние.

На рис. 4, а и 4, б показаны результаты моделирования напряженности магнитного поля с точки зрения ортогональных составляющих магнитного поля на гранях куба. На рис. 4, а представлена зависимость напряженности магнитного поля  $H_z$  в плоскости  $xOy$ , порождаемая катушкой индуктивности на плече, расположенном вдоль оси  $y$ . На рис. 4, б представлена зависимость

напряженность магнитного поля  $H_y$  в сечении  $zOy$ , порождаемая катушкой индуктивности на плече, расположенном вдоль оси  $z$ . Как можно видеть, основное влияние вносят грани куба.

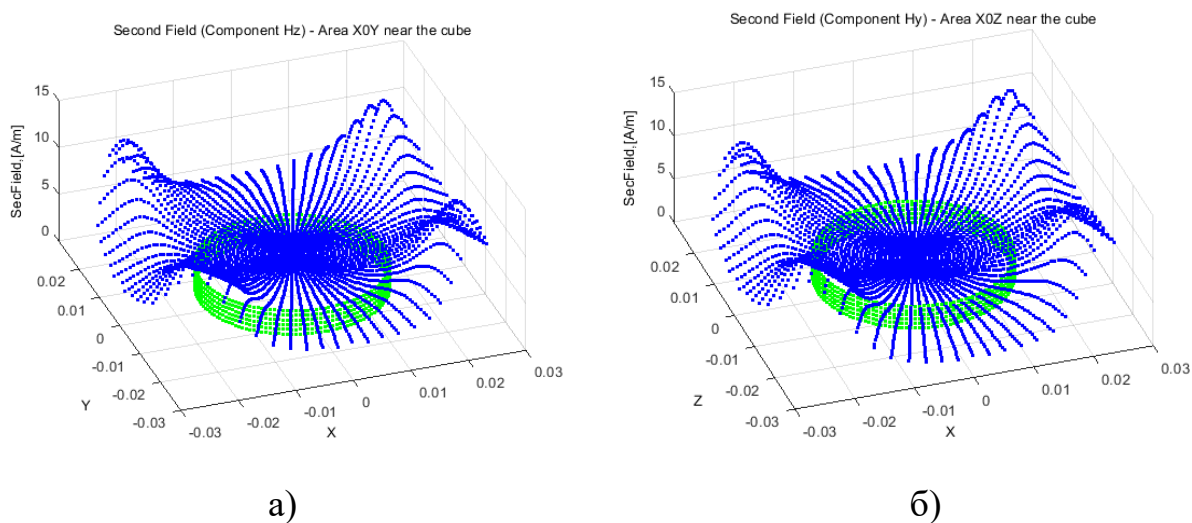


Рис. 4. Результаты моделирования распределения напряженности магнитного поля в сечении вблизи соединительного куба: компонента  $H_z$  для сечения  $xOy$  (а) и компонента  $H_y$  для сечения  $zOy$  (б)

При этом предложенный коэффициент ошибки в области наибольшего взаимовлияния (в сечение соединительно куба) составил  $K_{err} \approx 20,3\%$ .

## Заключение

В статье представлена структурная схема и принципы функционирования портативного измерительного устройства измерения амплитуд составляющих магнитного поля, принимаемого при помощи трехкоординатной магнитной антенны и вычисления модуля вектора магнитного поля. Нестандартное решение по использованию усилителей с управляемыми коэффициентами усиления позволяет усиливать амплитуду принимаемого сигнала и поддерживать его вблизи максимума динамического диапазона модуля АЦП для обеспечения наибольшей точности преобразования измеряемого напряжения малых амплитуд, составляющих порядка 100 мВ. Измерение вектора напряженности магнитного поля находит применение при проведении исследований проникающей способности горных пород для электромагнитных волн, что в



свою очередь важно при разработке систем поиска людей под завалами, а также при исследовании магнитного поля Земли.

### Литература

1. Sidorenko A.A., Sishchuk J.M., Gerasimova I.G. Underground mining of multiple coal seams: Problems and solutions. *Eurasian Mining*. 2016. V.2. P.11-15. <https://doi.org/10.17580/em.2016.02.03>
2. Широков И.Б., Гимпилевич Ю.Б., Дурманов М.А., Редькина Е.А., Скорик И.В. Усилитель мощности экспериментальной установки для исследований распространения электромагнитных волн низкочастотного диапазона при решении задач поиска людей под завалами. *Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. Междунар. научно-технический журнал*. 2011. №2. С.83-88.
3. Патент РФ №2594339. Широков И.Б., Дурманов М.А., Редькина Е.А., Скорик И.В. *Антенная система оборудования для поиска людей под завалами*. Дата заявки: 13.04.2016. Дата публикации: 10.08.2016. 6 с.
4. Patent USA №8 390 283. Mather P., Slaughter J., Rizzo N. *Three axis magnetic field sensor*. Application Date: 04.03.2015. Publication Date: 18.10.2016.
5. Ларченко А.В., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. Трехкомпонентные измерения структуры электромагнитного поля в диапазоне крайне низких и сверхнизких частот. *Радиотехника и электроника*. 2015. Т.60. №8. С.793-801.
6. Sheinker A., Ginzburg B., Salomonski N., Frumkis L., Kaplan B. Localization in 3-D Using Beacons of Low Frequency Magnetic Field. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2013. V.62. №12. P.3194-3201.
7. Shirokov I.B., Durmanov M.A., Redkina E.A., Naumicheva L.O. The calculation of magnetic field strength of magnetic antenna with ferromagnetic core in a task of people's search under avalanches. *Proceedings of V European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Rome, Italy. 2011. P.1845-1848.

8. Смирнов Б.М. Решение задачи определения координат источника магнитного поля. *Измерительная техника*. 2003. №7. С.38-42.

**Для цитирования:**

Широков И.Б., Дурманов М.А., Редькина Е.А. Устройство измерения модуля напряженности магнитного поля. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.7>