

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.2>

УДК: 621.318

# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МНОГОВИТКОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ В НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ БЛИЗОСТИ ОТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ В ЗАДАЧЕ ПОИСКА ЛЮДЕЙ ПОД ЗАВАЛАМИ В ШАХТАХ

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

Севастопольский государственный университет  
Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Статья поступила в редакцию 25 мая 2023 г.

**Аннотация.** В статье обсуждаются некоторые аспекты распространения низкочастотного переменного магнитного поля в неоднородной среде в горнодобывающих шахтах. Разработана теоретическая модель для расчета распределения магнитного поля в случае параллельного расположения продольных осей магнитной антенны и объемных металлических конструкций. В качестве металлических конструкций рассматривается рельсовое полотно, а в качестве магнитной антенны выступает многовитковая цилиндрическая катушка с ферромагнитным сердечником. Численный расчет распределения магнитного поля по предложенной модели проводился в несколько этапов с использованием метода интегральных уравнений. Данный метод основан на вычислении плотности гипотетических магнитных зарядов, возникающих на границе раздела двух сред, которые создают свое собственное магнитное поле в расчетном неоднородном пространстве. Проведены расчеты напряженности магнитного поля катушки с ферромагнитным сердечником

в непосредственной близости и на различных расстояниях от объемного металла. Доказана возможность использования ослабления низкочастотного магнитного поля для поиска людей под завалами.

**Ключевые слова:** напряженность магнитного поля; многовитковая цилиндрическая катушка; ферромагнитный сердечник; объемный металл.

**Автор для переписки:** Дурманов Максим Анатольевич,  
[max.durmanov@gmail.com](mailto:max.durmanov@gmail.com)

## **Введение**

На сегодняшний день горнодобывающая промышленность является одним из самых опасных видов деятельности человека. Ежегодно во всем мире в результате аварий на шахтах гибнут тысячи людей. Так, рабочие должны быть обеспечены специальным оборудованием, помогающим горноспасателям связываться с пострадавшими, локализованными завалом пород и непосредственно определять местонахождение людей, заблокированных в обвалоопасной зоне. Использование поискового оборудования потенциально увеличит количество спасаемых и снизит экономические затраты, связанные с проведением поисково-спасательных работ и восстановительных работ в шахтах.

### **1. Постановка задачи**

Некоторые аспекты поиска людей под завалами в шахтах обсуждались в работе [1], где для поиска людей используется низкочастотное магнитное поле. Использование такого подхода предполагает возможности низкочастотного сигнала проникать на большое расстояние в горную породу. Система состоит из поискового оборудования и рабочего маяка, в которых установлены рамочные антенны (магнитные антенны). Преимуществом магнитной антенны является ее малый размер [2, 3], что позволяет установить ее в шахтерский фонарь. Передающая антенна маяка формирует низкочастотное переменное электромагнитное поле. Это поле индуцирует электродвижущую силу (ЭДС)

индукции в приемной антенне. Величина ЭДС используется для локализации людей под завалами в шахтах [4]. Точность этого метода поиска определяется правильностью модели распределения магнитного поля в зоне поиска, которая обычно неоднородна. Здесь и далее мы будем иметь дело с напряженностью магнитного поля, пренебрегая электрической составляющей, считая, что его амплитуда зависит от частоты и свойств распространения магнитного поля. Объемный металл (например, рельсы) в поисковом пространстве приводит к значительному перераспределению магнитного поля. В поисковом пространстве в шахтах такое перераспределение зависит от взаимного расположения катушки маяка, катушки поисковой аппаратуры и неоднородности. Знание зависимостей напряженности магнитного поля от расстояния передающей катушки от рассматриваемых рельс позволит эффективно решать задачу поиска людей [5]. Таким образом, разработка теоретической модели, позволяющей рассчитать распределение магнитного поля катушки маяка в любой точке поискового пространства с неоднородностью (объемный металл), является актуальной задачей.

## 2. Этапы разработки модели

### А. Термины и определения

Разработана теоретическая модель для расчета распределения магнитного поля для случая параллельного взаимного расположения продольных осей передающей катушки и объемного металла, или неоднородности, например, рельсы (рис. 1 и 2). В модели предполагается, что в пространстве поиска среда имеет магнитную проницаемость  $\mu_e$ , а передающая катушка расположена на расстоянии  $h$  от массивного металла (рельсы). Передающая катушка представляет собой многовитковую цилиндрическую катушку с ферромагнитным сердечником. Объемный металл представляется в виде бесконечно длинного металлического цилиндра с магнитной проницаемостью  $\mu_i$ .

Численный расчет распределения магнитного поля по предложенной модели выполнен в несколько этапов с использованием метода интегральных уравнений.

На первом этапе определялось магнитное поле, создаваемое многовитковой цилиндрической катушкой в однородном поисковом пространстве, по модели, описанной в [6]. На этом этапе были получены составляющие напряженности магнитного поля  $H_{z1}$  и  $H_{\rho1}$  в цилиндрической системе координат (напряженность магнитного поля  $H$  не имеет составляющей вдоль  $\alpha$  из-за радиальной симметрии многовитковой цилиндрической катушки). В дальнейшем для расчета полного магнитного поля в неоднородном пространстве поиска эти значения использовались как «первичные» компоненты поля.

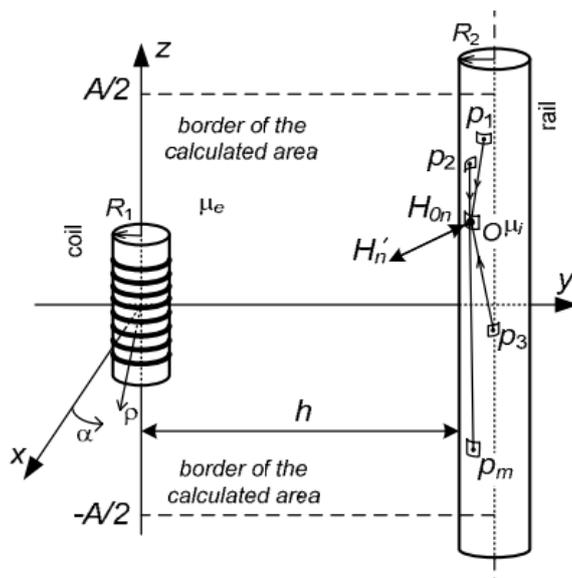


Рис. 1. Теоретическая модель 1 расчета магнитного поля для случая параллельного расположения катушки и рельсы.

На втором этапе методом интегральных уравнений неоднородное пространство было преобразовано в условно однородное с магнитной проницаемостью  $\mu_e$ . Для выполнения граничных условий на краях сред с различной проницаемостью ( $\mu_e$  и  $\mu_i$ ) вместо рельсы в модель был добавлен ряд гипотетических магнитных зарядов, распределенных по боковой поверхности стального цилиндра (рельсы). Внутри цилиндра отсутствуют виртуальные

магнитные заряды за счет однородного материала объемного металла ( $\text{grad } \mu_i = 0$ ).

Гипотетические магнитные заряды создают «вторичное» магнитное поле в расчетном однородном пространстве. Поскольку распределение плотности магнитного заряда  $\sigma_m$  определяется величиной «первичной» напряженности поля и «вторичной», для определения  $\sigma_m$  использовалось интегральное уравнение [7]. Это уравнение может быть решено численным методом:

$$\sigma_m - \frac{\lambda}{2\pi} \oint_S \frac{\sigma_m \cos(\mathbf{r}, \mathbf{n})}{r^2} ds = 2\mu_e H_{0n},$$

где  $H_{0n}$  – нормальная (к боковой поверхности) составляющая напряженности магнитного поля;  $\lambda$  – коэффициент преобразования сред, рассчитывается из граничного условия (равенство напряженности магнитного поля),  $\lambda = (\mu_i - \mu_e) / (\mu_i + \mu_e)$ ;  $\mathbf{r}$  – вектор расстояния от испытываемой точки до точек на боковой поверхности, создающих «вторичное» поле в испытываемой точке;  $\mathbf{n}$  – вектор нормали к боковой поверхности  $S$  объемного металла.

Для определения распределения плотности магнитного заряда  $\sigma_m$  численным методом боковая поверхность была разбита на точки с координатами  $(\rho_i, \alpha_i, z_k)$ , поэтому интегральное уравнение было представлено в виде системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_m(\rho_1, \alpha_1, z_1) - \frac{\lambda}{2\pi} \oint_S \frac{\sigma_m(\rho, \alpha, z) \cos(\mathbf{r}, \mathbf{n})}{r^2(\rho_1, \alpha_1, z_1, \rho, \alpha, z)} ds = 2\mu_e \lambda H_{0n}(\rho_1, \alpha_1, z_1). \\ \sigma_m(\rho_1, \alpha_1, z_2) - \frac{\lambda}{2\pi} \oint_S \frac{\sigma_m(\rho, \alpha, z) \cos(\mathbf{r}, \mathbf{n})}{r^2(\rho_1, \alpha_1, z_2, \rho, \alpha, z)} ds = 2\mu_e \lambda H_{0n}(\rho_1, \alpha_1, z_2), \\ \dots \\ \sigma_m(\rho_N, \alpha_N, z_M) - \frac{\lambda}{2\pi} \oint_S \frac{\sigma_m(\rho, \alpha, z) \cos(\mathbf{r}, \mathbf{n})}{r^2(\rho_N, \alpha_N, z_M, \rho, \alpha, z)} ds = 2\mu_e \lambda H_{0n}(\rho_N, \alpha_N, z_M). \end{array} \right.$$

Система уравнений была преобразована в матричное уравнение, где поверхностные интегралы заменены суммой дискретных точек на боковой поверхности объемного металла:

$$\mathbf{M}_{coef} \mathbf{M}_{\sigma_{mag}} = \mathbf{M}_{H_{0n}},$$

где  $\mathbf{M}_{\sigma_{mag}} = \sigma_m(\rho_i, \alpha_j, z_k)$  – матрица искомых величин плотности магнитного заряда в пятнах на боковой поверхности;  $\mathbf{M}_{coef}$  – матрица коэффициентов при требуемых значениях плотности магнитного заряда в точках на боковой поверхности, матрица определяется только пространственной конфигурацией объемного металла (боковой поверхности);  $\mathbf{M}_{H_{0n}} = H_{0n}(\rho_i, \alpha_j, z_k)$  – матрица модулей нормальной составляющей напряженности «первичного» магнитного поля, матрица определяется как распределением «первичного» поля в поиске пространство и пространственная конфигурация объемного металла. Используя распределение плотности магнитного заряда, определенное по следующему уравнению:  $\mathbf{M}_{\sigma_{mag}} = \mathbf{M}_{coef}^{-1} \mathbf{M}_{H_{0n}}$ , «вторичное» поле было рассчитано из:

$$H'_n = \frac{\lambda}{2\pi} \oint_S \frac{\sigma_m \cos(\mathbf{r}, \mathbf{n})}{r^2} ds.$$

Требуемое суммарное распределение магнитного поля многовитковой цилиндрической катушки при ее параллельном или перпендикулярном расположении по отношению к металлическому цилиндру в поисковом пространстве получено путем суммирования «вторичного» и «первичного» полей для различных расстояний  $h$  между катушкой и металлическим цилиндром.

## Б. Анализ распределения магнитного поля

Проводя анализ распределения магнитного поля многовитковой цилиндрической катушки при ее параллельном расположении металлическому цилиндру в неоднородном поисковом пространстве (рис. 2), нормальная составляющая «первичного» поля определяется как:

$$H_{0n}(\rho_i, \alpha_i, z_k) = H_{\rho 1}(\rho_i, \alpha_i, z_k) \cos(\varphi(\rho_i, \alpha_i)),$$

где  $H_{\rho 1}(\rho_i, \alpha_i, z_k)$  – компонента напряженности «первичного» магнитного поля по отношению к единичному вектору  $\rho$ ;  $\rho_i$  – координата тестируемой дискретной точки на боковой поверхности неоднородности, зависит от формы поверхности

и координаты  $\alpha_i$ ;  $\varphi(\rho_i, \alpha_i)$  – угол между нормалью и направлением компоненты  $H_{\rho 1}$ :

$$\rho_i = (h + R_2) \sin \alpha_i + \sqrt{(h + R_2)^2 \sin^2 \alpha_i - 2((h + R_2)^2 - R_2^2)},$$

$$\varphi(\rho_i, \alpha_i) = \pi - \arccos\left(\left(\rho_i^2 + R_2^2 - (h + R_2)^2\right) / (2\rho_i R_2)\right).$$

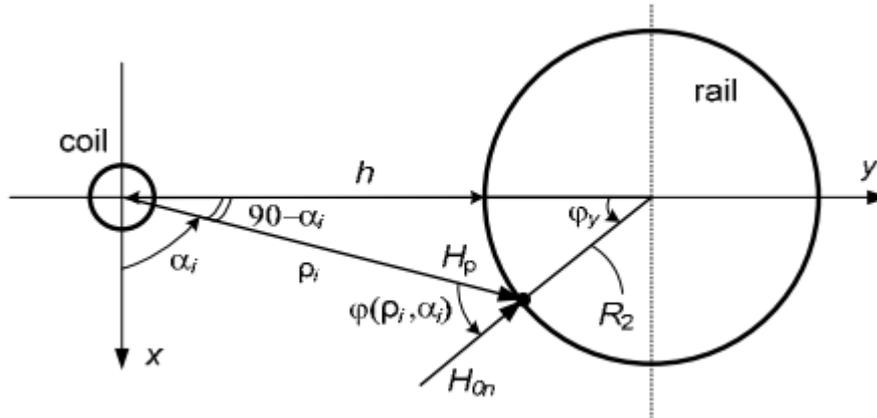


Рис. 2. Определение нормальной составляющей (по отношению к боковой поверхности металлического цилиндра) напряженности «первичного» магнитного поля.

Нормальная составляющая (к боковой поверхности металлического цилиндра) «вторичного» поля определяется в точках всего поискового объема численно согласно выражению:

$$H'_z(\rho_{i1}, \alpha_{i1}, z_{k1}) = \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sigma_m(\rho_i, \alpha_i, z_k) \frac{\cos(\mathbf{r}, \mathbf{n}) \Delta z \Delta \rho \Delta \alpha}{r^2(\rho_{i1}, \alpha_{i1}, z_{k1}, \rho_i, \alpha_i, z_k)}.$$

Для определения составляющих  $H_{\rho 2}$  и  $H_{\alpha 2}$  «вторичной» напряженности поля составляющая  $H'_{0n}$  была разложена на составляющие декартовой системы координат  $H_{y2}$  и  $H_{x2}$ , которые на следующем шаге расчетов были преобразованы в составляющие цилиндрической системы координат:

$$H_{y2}(\rho, \alpha, z) = H'_{0n}(\rho, \alpha, z) \cos(\varphi_y);$$

$$H_{x2}(\rho, \alpha, z) = H'_{0n}(\rho, \alpha, z) \sin(\varphi_y);$$

$$H_{\rho 2}(\rho, \alpha, z) = H_{x2}(\rho, \alpha, z) \cos(\alpha) + H_{y2}(\rho, \alpha, z) \sin(\alpha);$$

$$H_{\alpha 2}(\rho, \alpha, z) = -H_{x2}(\rho, \alpha, z) \sin(\alpha) + H_{y2}(\rho, \alpha, z) \cos(\alpha).$$

Результаты расчетов распределения магнитного поля в неоднородном пространстве многовитковой катушкой при ее параллельном расположении

металлическому цилиндру представлены на рис. 3, 4 и 5. Расчеты распределения магнитного поля вдоль оси  $z$  выполнены для  $y = 6$  см (вблизи катушки). Расчеты распределения магнитного поля вдоль оси  $y$  проводились для  $z$  равной половине длины катушки.

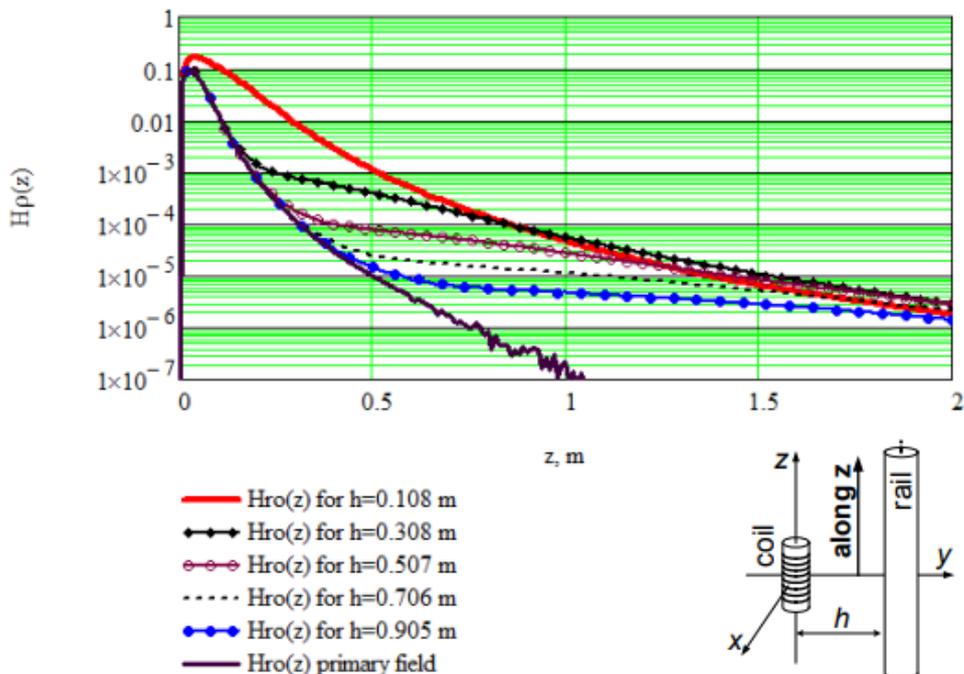


Рис. 3. Графики зависимостей результирующей напряженности магнитного поля  $H_{\rho}$  от  $z$  для случая параллельного расположения катушки и рельсы,  $h$  – параметр.

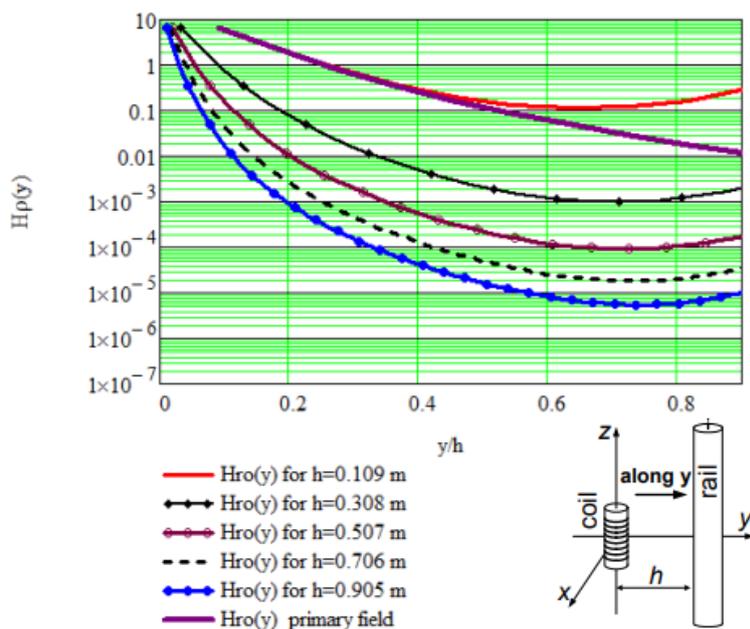


Рис. 4. Графики зависимостей результирующей напряженности магнитного поля  $H_{\rho}$  от  $y/h$  для случая параллельного расположения катушки и рельсы,  $h$  – параметр.

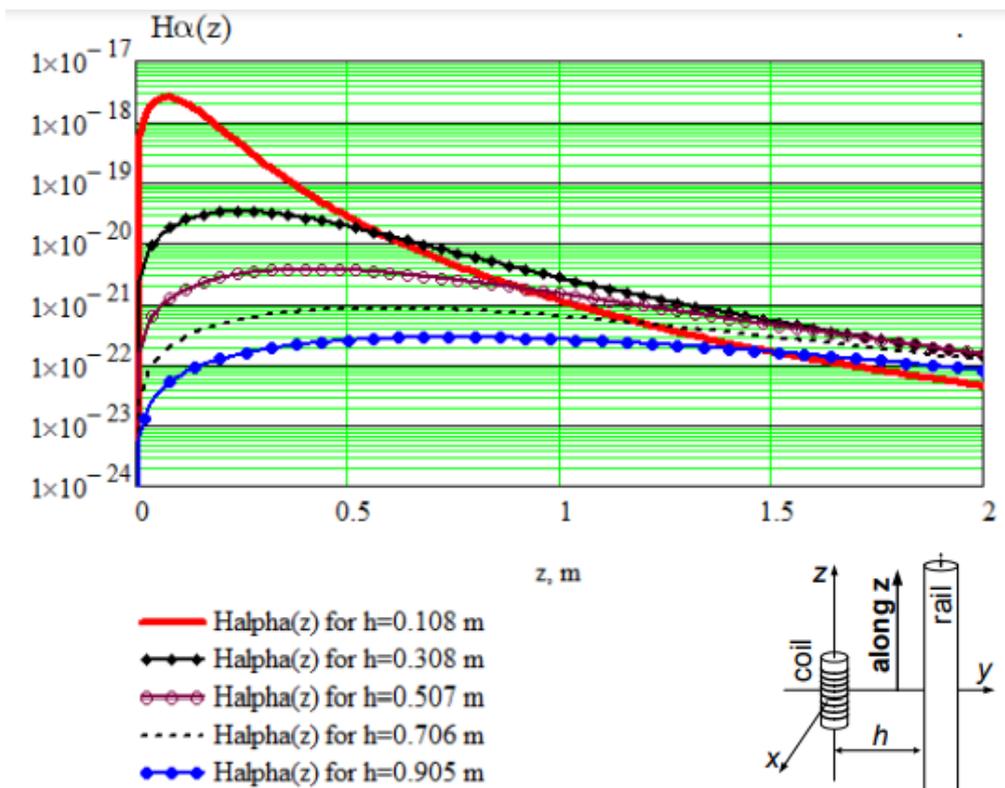


Рис. 5. Графики зависимостей результирующей напряженности магнитного поля  $H_{\alpha}$  от  $z$  для случая параллельного расположения катушки и рельсы,  $h$  – параметр

Из зависимостей видно, что для случая параллельного расположения катушки и металлического цилиндра объемный металл не изменяет распределения компоненты магнитного поля  $H_z$  и существенно замедляет уменьшение составляющей  $H_{\rho\Sigma}$ . Приближение катушки к металлическому цилиндру приводит к увеличению составляющей магнитного поля  $H_{\rho\Sigma}$  в пространстве между катушкой и объемным металлом. Полученные распределения  $H_{\rho\Sigma}(z)$  для различных значений  $h$  имеют схожие формы уменьшения поля. Исключение составляет случай расположения катушки на расстоянии  $h = 0,109$  м от металлического цилиндра. В этом случае распределение магнитного поля характеризуется эффектом «стягивания» силовых линий в узком пространстве вблизи металлического цилиндра. Силовые линии «входят» в металлический цилиндр под малыми углами и «вытягиваются» в плоскости  $xOy$ . Также объемный металл в поисковом пространстве нарушает радиальную симметрию магнитного поля от катушки, но величина компоненты  $H_{\alpha\Sigma}$  пренебрежимо мала.

## Заключение

Таким образом, для неоднородного пространства поиска получены зависимости компонент магнитного поля  $H_{\rho\Sigma}$  и  $H_{\alpha\Sigma}$  от координат вдоль массивного металлического объекта по оси  $z$  и поперек него – по оси  $y$ .

Из кривых (рис. 3, 4) видно, что компоненты магнитного поля  $H_{\rho\Sigma}(\rho)$  и  $H_{\rho\Sigma}(z)$  в непосредственной близости от катушки ( $z = 0,1$  м и  $\rho = 0,1$  м) имеют сравнимые величины. Также, если проследить напряженность магнитного поля этих компонент в точках  $(\rho; z)$ :  $(0,5; 0,5)$  и  $(1; 1)$ , то можно обнаружить, что их величины также примерно одинаковы. Только в непосредственной близости от катушки компоненты поля существенно различаются. Это положительный момент, так как можно сделать вывод, что на большом расстоянии от катушки исследуемые компоненты также не сильно отличаются друг от друга.

Анализ кривых «первичного» и результирующего полей позволяет определить вклад поля, создаваемого ферритовым сердечником.

Компоненты магнитных полей  $H_{\rho\Sigma}(\rho)$  и  $H_{\rho\Sigma}(z)$  не имеют отрицательных значений в непосредственной близости от катушки (при  $z = 0,1$  м и  $\rho = 0,1$  м). Характер ослабления поля практически не отличается, так как магнитные заряды создают поле, которое естественным образом затухает.

И, наконец, можно сделать главный следующий вывод: наличие в шахтах сыпучего металла не приводит к резкому нарушению распределения магнитного поля. Только нахождение пострадавшего в непосредственной близости к рельсам может привести к определенным проблемам при его поиске с помощью поискового оборудования. Но с помощью определенных мероприятий (схема рельсов известна заранее) эту проблему можно решить.

## Литература

1. Широков И. Б. и др. Построение системы поиска людей под завалами с использованием проникающих свойств переменного магнитного поля низкой частоты. – 2010.
2. Pelgrum W. J. New potential of low-frequency radionavigation in the 21st century. – 2006.
3. Хомич В. И. Ферритовые антенны. – 1969.
4. Shirokov I. B., Durmanov M. A. Using of H-field antennas in system for searching of people under avalanches //Proceedings of International Conference on Antenna Theory and Techniques. – 2009. – С. 236-238.
5. Shirokov I. B., Durmanov M. A., Redkina E. A. The calculation of magnetic field strength in inhomogeneous medium in tasks of people's searching under avalanches in mines //2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. – IEEE, 2010. – С. 000134-000137.
6. Shirokov I. B. et al. 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). – 2011. – С. 1845-1848.
7. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники, т. I., т. II Санкт Петербург: Питер. – 2004.

### Для цитирования:

Широков И.Б., Дурманов М.А., Редькина Е.А. Магнитное поле многовитковой цилиндрической катушки с ферромагнитным сердечником в непосредственной близости от металлических конструкций в задаче поиска людей под завалами в шахтах // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 9 <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.2>