

**ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ МАЛОГЛУБИННЫХ
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ**

Арзамасцев Е.В. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Статья посвящена вопросам конструирования широкополосных индукционных датчиков магнитного поля для электроразведки методами электромагнитного зондирования и профилирования. В статье уделено внимание причинам нестабильности параметров чувствительности датчика, источникам собственных шумов. Приведены зависимости его чувствительности и фазового сдвига выходного сигнала датчика от частоты измеряемого поля.

Электроразведка, индукционные измерения, широкополосный датчик магнитного поля, магнитная проницаемость сердечника, чувствительность датчика магнитного поля, уровень собственных шумов.

**WIDEBAND INDUCTION MAGNETIC FIELD SENSOR
FOR SHALLOW ALTERNATING CURRENT ELECTRICAL RESEARCH**

Arzamastsev E.V. – Institute of Geophysics of UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. The article is devoted to the issues of designing broadband induction magnetic field sensors for electrical prospecting by methods of electromagnetic sounding and profiling. The article pays attention to the reasons for the instability of the sensor sensitivity parameters, the sources of intrinsic noise. The dependences of its sensitivity and phase shift of the sensor output signal on the frequency of the measured field are given.

Electrical prospecting, induction measurements, broadband magnetic field sensor, core magnetic permeability, magnetic field sensor sensitivity, level of intrinsic noise.

Введение

Соотношение амплитуд и сдвигов фаз векторов напряженности переменных электрического и магнитного полей находятся в тесной взаимосвязи с электрическими параметрами окружающей среды. Существует ряд методов геофизики, изучающих как верхнюю часть геологического разреза, так и глубинное строение Земли путем интерпретации амплитудно-фазовых измерений компонент электромагнитного поля на поверхности. Измерение электрических компонент, при этом, обычно осуществляется с помощью заземленных линий, а магнитное поле может быть измерено специализированными магнитными датчиками.

Для электроразведочных исследований используются компонентные датчики магнитного поля, измеряющие проекцию полного вектора магнитного поля на выбранную ось. Среди различных типов векторных магнитных датчиков, индукционные датчики наилучшим образом подходят для измерения переменных полей с частотами,

лежащими выше нескольких десятков герц. Это обусловлено их относительной простотой, ростом чувствительности с повышением частоты и стабильностью параметров.

Поскольку малоглубинные электроразведочные исследования требуют достаточно высокой разрешающей способности и хорошего отклика от небольших аномальных объектов, то частота поля, на которой производятся исследования, устанавливается равной десяткам и первым сотням килогерц. Такой частотный диапазон используется многими исследователями и реализован в различных комплексах аппаратуры (Байдиков, Человечков, 2011; Won et al., 2006).

Понижение частоты, наоборот, позволяет снизить влияние поверхностных локальных неоднородностей на результат измерений. Сочетание высокочастотного и низкочастотного диапазонов предоставляет возможность адаптировать методику измерений в зависимости от типа геологи-

ческого разреза и задачи исследований. Поэтому создание аппаратуры, позволяющей охватывать большой частотный диапазон, является актуальной технической задачей.

Целью работы является создание экспериментального широкополосного индукционного датчика магнитного поля с частотным диапазоном от 1 до 200 кГц для проведения исследований методами индукционного зондирования и профилирования.

Преобразователь магнитной индукции

Основным элементом индукционных датчиков является преобразователь индукции магнитного поля в напряжение. От его конструкции зависят чувствительность, частотный диапазон, масса и габариты датчика.

Принцип действия индукционных преобразователей магнитного поля, как и магнитных антенн, основан на законе электромагнитной индукции. Согласно этому закону, для разомкнутого проводящего контура, окружающего заданную площадь и помещенного в гармоническое магнитное поле, можно записать

$$\varepsilon = \omega SB, \quad (1)$$

где ε – ЭДС в контуре, создаваемая магнитным полем; ω – круговая частота магнитного поля; B – амплитуда индукции магнитного поля, пронизывающей контур; S – площадь контура.

Обмотка индукционного преобразователя наматывается из большого числа витков изолированного провода – проводящих контуров, расположенных на одном сердечнике. Для улучшения характеристик чувствительности датчика, сокращения его массы и габаритов, сердечником обычно является стержень из ферромагнитного материала, обладающего высокой магнитной проницаемостью.

Магнитным материалом сердечника индукционного преобразователя выбран термостабильный феррит 2000НМ1. Низкие магнитные потери, низкий температурный коэффициент магнитной проницаемости в слабых переменных полях с частотами до 600 кГц, в сочетании с высокой маг-

нитной проницаемостью, делают этот магнитный материал наиболее подходящим при разработке индукционных датчиков магнитного поля (Справочник ... , 1988, с. 54–55).

Ферритовый сердечник датчика состоит из 24 колец марки 2000НМ1, одетых на керамическую трубку диаметром 5 мм и соединенных клеем БФ-4. Внешний диаметр сердечника равен 12 мм, длина сердечника 134 мм.

Поскольку сердечник собран из отдельных ферритовых колец, в местах склейки колец между собой образуются небольшие размагничивающие зазоры, которые в сочетании с заданными внешними геометрическими параметрами сердечника, определяют его коэффициент размагничивания и магнитную проницаемость.

Оценим эффективную магнитную проницаемость сердечника, определяя отклик напряжения на сигнал магнитного поля известной величины, с учетом площади сечения сердечника и количества витков на нем. Для этого, с помощью тока заданной амплитуды и частоты в одновитковой квадратной рамке, создадим относительно однородный объем магнитного поля. Величина магнитного поля в центре рамки рассчитывается по простой формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I 2\sqrt{2}}{\pi a}, \quad (2)$$

где B – модуль вектора магнитной индукции в центре рамки; I – величина тока в контуре; μ_0 – магнитная постоянная; a – длина стороны рамки. Соотношение справедливо в системе СИ.

В нашем случае для определения чувствительности датчика использовалась рамка со стороной 1 м. Воспользуемся измеряемыми значениями амплитуды магнитного поля, чтобы сделать вывод о степени его однородности. Для этого расположим датчик в точке, равноудаленной от сторон рамки, перпендикулярно ее плоскости, так чтобы датчик пересекал плоскость рамки посередине своей длины (рис. 1). При смещении из этой точки на 10 см к одной из сторон рамки, величина напряже-

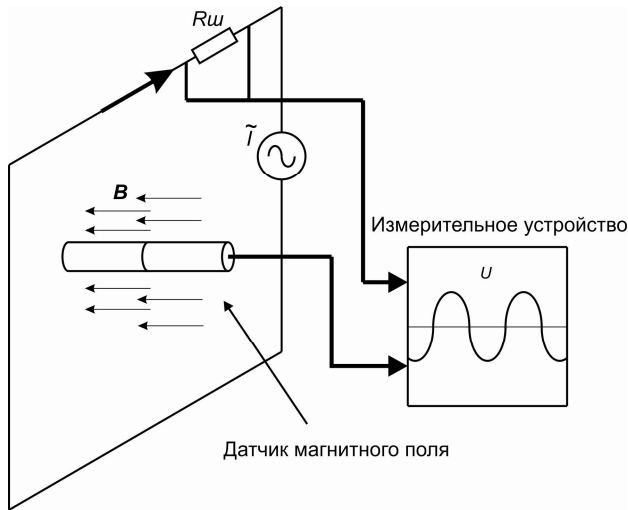


Рис. 1. Расположение рамки с током и магнитного датчика при измерении чувствительности:

I – сила тока в рамке;

B – вектор магнитной индукции в центре рамки.

Направление вектора указано при направлении тока, совпадающем с направлением обхода контура, обозначенном стрелкой.

$R_{ш}$ – измерительный шунт в цепи рамки

ния на выходе датчика становится больше на 2,6%.

При перемещении датчика из центра перпендикулярно плоскости рамки на величину, равную половине длины его сердечника, также получим изменение напряжения на его выходе около 2,6%. Как мы видим, магнитное поле в центре рамки с длиной стороны 1 м обладает достаточно высокой степенью однородности в объеме, занимаемом сердечником датчика.

В результате таких калибровочных измерений магнитного поля на частоте 1 кГц, при амплитуде магнитного поля 33 нТл, получена чувствительность индукционного преобразователя датчика 47 мкВ/нТл. Количество витков обмотки на сердечнике преобразователя – 2000, диаметр сердечника 12 мм, диаметр внутреннего отверстия в кольце сердечника составляет 5 мм. Пренебрегая магнитным потоком вне сердечника, получим величину его магнитной проницаемости, равную 40.

Оценим температурный фактор нестабильности магнитной проницаемости сердечника индукционного преобразователя.

Для этого будем использовать справочные данные, ранее измеренное значение магнитной проницаемости сердечника и формулу:

$$\mu_c = \frac{\mu}{1 + \frac{N\mu}{4\pi}}, \quad (3)$$

где μ_c – эффективная магнитная проницаемость сердечника; μ – магнитная проницаемость материала; N – коэффициент размагничивания сердечника. Соотношение справедливо в системе СГСМ.

Формула (3) отражает связь измеренной эффективной магнитной проницаемости сердечника с коэффициентом размагничивания и магнитной проницаемостью материала, из которого он сделан (Преображенский, 1965, с. 33–34).

Для феррита 2000НМ1 нормируется величина температурных колебаний значения магнитной проницаемости. Относительный температурный коэффициент магнитной проницаемости составляет $0,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в диапазоне от -10 до $+70$ $^\circ\text{C}$ (Преображенский, 1965, с. 84–87; Справочник ..., 1988, с. 54–55). Изменение магнитной проницаемости при изменении температуры рассчитывается по формуле:

$$\alpha_p = \frac{\mu_{t2} - \mu_{t1}}{\mu_{t1}^2 (t_2 - t_1)}, \quad (4)$$

где α_p – относительный температурный коэффициент магнитной проницаемости феррита; μ_{t1} и μ_{t2} – значения магнитной проницаемости при температурах t_1 и t_2 соответственно.

Примем рабочий диапазон температур датчика от -10 до $+40$ $^\circ\text{C}$, а значение магнитной проницаемости при 25 $^\circ\text{C}$ равным 2000. Рассчитывая изменение магнитной проницаемости в зависимости от температуры, получим колебания в пределах от $-5,6$ до $+2,4$ %. Как мы видим, 2000НМ1 не очень стабильный магнитный материал.

Далее, рассчитывая коэффициент размагничивания сердечника из формулы (3), находим $N = 0,308$. Как было сказано выше, начальная магнитная проницаемость феррита 2000НМ1 изменяется в пределах от $-5,6$ до $2,4\%$ при среднем значении

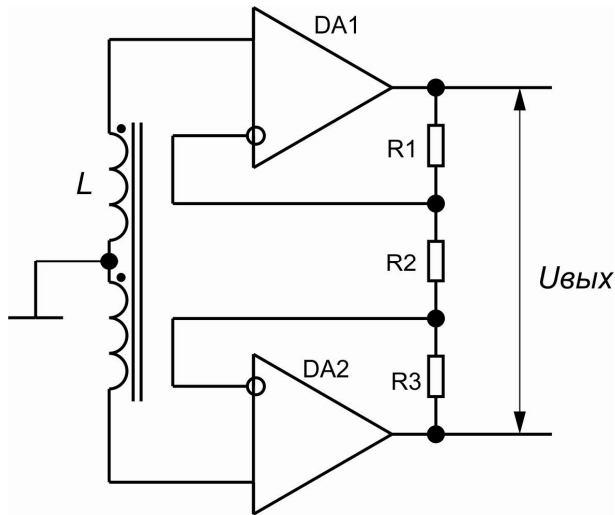


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема предварительного усилителя сигнала: DA1, DA2 – ОРА827; R1, R3 – 3 кОм; R2 – 300 Ом; L – преобразователь магнитной индукции

2000. мс, при этом, будет изменяться в диапазоне от $-0,15$ до $+0,06\%$.

Необходимо отметить, что величина начальной магнитной проницаемости 2000НМ1 может лежать в диапазоне от 1700 до 2500 (Справочник ... , 1988, с. 54–55). Поэтому термостабильность магнитных свойств сердечников, одинаковых по форме и сделанных из одной и той же марки материала, может отличаться, однако отличия не будут превышать сотых долей процента.

Предварительный усилитель выходного сигнала

В состав датчика магнитного поля также входит активный усилитель напряжения (рис. 2) с высоким входным сопротивлением и низким сопротивлением выхода. Использование активного дифференциального усилителя позволяет расширить динамический диапазон выходных напряжений датчика и снизить влияние синфазных помех на результат измерения.

Коэффициент усиления предварительного усилителя равен 21. Такое небольшое значение продиктовано снижением коэффициентов усиления операционных усилителей на высоких частотах. На самой высокой частоте рабочего диапазона датчика

200 кГц коэффициент усиления ОРА827 не превышает 100.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала равен коэффициенту усиления схемы (Хоровиц, Хилл, 1993, с. 43). Но, с использованием электрического экрана, такое включение позволяет достичь низкого уровня синфазных помех. Электрический экран сделан в виде разомкнутой цилиндрической поверхности из сплошной алюминиевой фольги.

Операционные усилители ОРА827 были выбраны, исходя из требований высокого входного сопротивления и низкой спектральной плотности среднеквадратической величины шумового тока входа, так как импеданс обмотки индукционного преобразователя в рабочем диапазоне частот достаточно велик и составляет от 2 до 154 кОм.

Частотные характеристики чувствительности и уровня собственных шумов

Поскольку импеданс датчика определяется сочетанием собственной индуктивности и паразитной емкости обмотки преобразователя магнитной индукции, а также влиянием емкости входа активного усилителя, то его частотные характеристики чувствительности и сдвига фазы нелинейны (рис. 3).

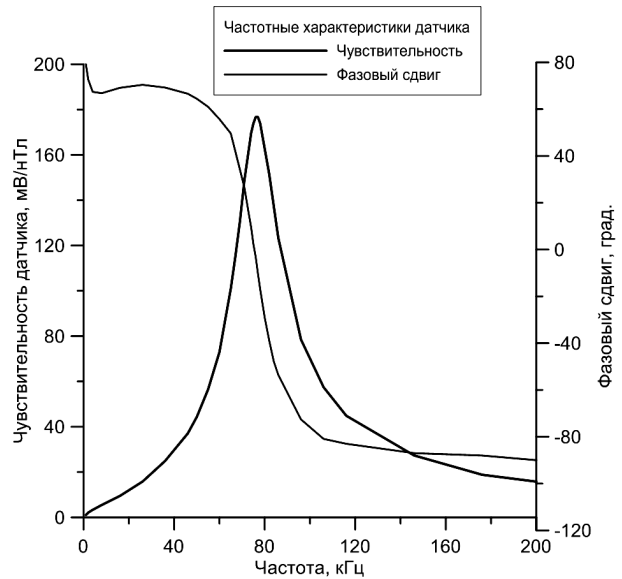


Рис. 3. Форма зависимости чувствительности датчика и фазового сдвига выходного напряжения от частоты магнитного поля

Частота собственного резонанса датчика составляет 76 кГц при добротности колебательного контура 4,4. Высокие потери энергии в колебательном контуре возникают при взаимодействии магнитного поля рассеяния на торцах сердечника со сплошным металлическим экраном.

Минимальный уровень сигнала, точно измеряемый датчиком, ограничен величиной собственных шумов. Соотнося спектральную плотность среднеквадратического шума датчика и ширину полосы пропускания измерительного прибора, можно оценить минимальную величину сигнала, измеряемую с заданной погрешностью.

Собственный шум датчика состоит из шумов входного тока операционных усилителей, тепловых шумов резисторов обратной связи R1, R2, R3 и приведенного к входу усилителя напряжения шумов операционных усилителей (см. рис. 2). Спектральная плотность собственных шумов датчика рассчитывается по формуле:

$$B_{ш} = \frac{\sqrt{2}K}{S} \sqrt{i_{ш}^2 |Z_L + R_{ш}|^2 + 4kTR_{ш} + e_{ш}^2}, \quad (5)$$

где $R_{ш} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}$, R1, R2, R3 – согласно

рис. 3; $B_{ш}$ – спектральная плотность шумов магнитной индукции датчика; $i_{ш}$ – спектральная плотность среднеквадратического шумового тока входа операционного усилителя, 2,2 фА/√Гц; Z_L – комплексный импеданс датчика; $e_{ш}$ – спектральная плотность среднеквадратического напряжения шумов, 4 нВ/√Гц; S – чувствительность датчика на данной частоте, В/Тл; K – коэффициент усиления предварительного усилителя, $K = 21$; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К.

Во всем частотном диапазоне модуль импеданса датчика не превышает 154 кОм. Тогда квадрат слагаемого входного напряжения шумов, определяемого шумами входного тока, как минимум на два порядка меньше, чем величина слагаемого, определяемого квадратом напряжения шумов входа операционного усилителя и тепловых шумов резисторов. Формула (5) может

быть переписана без учета шумового тока входа операционного усилителя:

$$B_{ш} = \frac{\sqrt{2}K}{S} \sqrt{4kTR_{ш} + e_{ш}^2}. \quad (6)$$

В табл. 1 приведены измеренная величина чувствительности и уровень собственных шумов датчика в рабочем частотном диапазоне.

На частоте собственного резонанса достигается максимум чувствительности и минимальный уровень собственных шумов датчика.

Результаты

В ходе проведенной экспериментальной работы по созданию широкодиапазонного датчика для малоглубинных исследований, получены следующие результаты:

Испытан макет индукционного датчика магнитного поля в диапазоне частот от 1 до 200 кГц, получены его амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики.

Проведена оценка стабильности свойств используемого магнитного сердечника в заданных условиях работы, рассчитан уровень собственных шумов датчика.

Таблица 1. Чувствительность и спектральная плотность среднеквадратической магнитной индукции шумов датчика

| Частота, кГц | Чувствительность датчика S, мВ/нТл | Спектральная плотность среднеквадратической магнитной индукции шумов, нТл/√Гц |
|--------------|------------------------------------|---|
| 1 | 1,09 | 1,77E-04 |
| 2 | 2,11 | 9,11E-05 |
| 16 | 9,48 | 2,03E-05 |
| 36 | 24,91 | 7,71E-05 |
| 50 | 44,36 | 4,33E-05 |
| 65 | 100,97 | 1,9E-06 |
| 76 | 176,69 | 1,09E-06 |
| 86 | 123,4 | 1,56E-06 |
| 106 | 57,49 | 3,34E-06 |
| 146 | 27,35 | 7,03E-06 |
| 176 | 18,84 | 1,02E-05 |
| 200 | 15,8 | 1,22E-05 |
| 250 | 10,03 | 1,92E-05 |

Амплитудно-частотная характеристика датчика имеет резонансный характер и максимум на частоте 76 кГц. При этом резонансная полоса пропускания по уровню $\frac{1}{2}$ мощности сигнала составляет около 17 кГц (см. рис. 3). Добротность колебательного контура равна 4,4. Благодаря невысокой величине добротности, чувствительность датчика в области резонансных частот не будет зависеть от малых изменений индуктивно-емкостных параметров контура и связанного с ними изменения резонансной частоты.

Фазовый сдвиг в частотном диапазоне от 65 до 86 кГц быстро изменяется с ростом частоты, в среднем по пять градусов на килогерц (см. рис. 3). Этот участок может использоваться для измерений фазы магнитного поля, но при условии стабильности положения резонансной частоты.

Диапазон температурных колебаний магнитной проницаемости сердечника, и соответственно, собственной индуктивности обмотки датчика, как было рассчитано ранее, составляет от $-0,15$ до $0,06\%$. Общая емкость экранированной обмотки датчика зависит только от межвитковой емкости и взаимной емкости обмотки и экрана. Емкость обмотки равна приблизительно 30 пФ.

Среднеквадратическая величина шумов датчика на высокочастотной границе рабочего диапазона на порядок меньше, чем в низкочастотной части (см. табл. 1). Поскольку на высоких частотах полоса пропускания измерительной аппаратуры должна быть больше, это дает определенные преимущества для достижения приемлемого уровня шумов во всем рабочем частотном диапазоне.

Предварительный усилитель датчика обладает крайне малым значением шумового входного тока ($3,1 \text{ фА}/\sqrt{\text{Гц}}$), шум которого на высоком импедансе преобразователя магнитной индукции, достигающем 150 кОм, практически не заметен. Значение спектральной плотности среднеквадратического шумового напряжения усилителя, приведенного к его входу, составляет $9,14 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Фундаментальных исследований УрО РАН № 18-5-5-38.

Литература

- Байдиков С.В., Человечков А.И.* Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1. С. 4–8.
- Преображенский А.А.* Магнитные материалы. М.: Высшая школа, 1965. 235 с.
- Справочник по электротехническим материалам.* Т. 3. / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 728 с.
- Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. Т. 2. Изд. 4-е. М.: Мир, 1993. 378 с.
- Won I.J., Keiswetter D.A., Fields George R.A., Sutton L.S.* GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2006. Vol. 1. P. 129–137.