

УДК 550.8.08

Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований

© 2016 г. С.В. Поляков¹, Б.И. Резников¹, А.В. Щенников¹,
Е.А. Копытенко^{2,3}, Б.В. Самсонов³

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт (ФГБНУ НИРФИ) Министерства образования и науки Российской Федерации, г. Нижний Новгород, Россия

² Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН), г. Санкт-Петербург, Россия

³ ООО «Восточно-Европейская геофизическая ассоциация (ООО «ВЕГА»), г. Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты многолетней совместной работы коллектива специалистов Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) и ООО «Восточно-Европейской геофизической ассоциации» (ООО «ВЕГА») по разработке современных индукционных датчиков магнитного поля. Проведен сравнительный анализ характеристик наиболее известных в мире моделей датчиков, рассмотрены основные методы и особенности их проектирования и тестирования. Описана линейка разработанных авторами малошумящих индукционных магнитометров для научных и геофизических наземных исследований (IMS-007, IMS-008, IMS-009). Приведены результаты работ, полученные с применением этих датчиков в задачах поиска геотермальных вод методом широкополосного магнитотеллурического зондирования, в изучении глубинного строения литосферы методом электромагнитного зондирования с контролируемым источником, а также в чисто академических задачах мониторинга естественного электромагнитного поля Земли.

Ключевые слова: индукционный магнитометр, магнитотеллурическое зондирование, переменное магнитное поле Земли, ионосферный альвеновский резонатор.

PACS: 07.55.Ge, 93.85.+q, 93.85.-q.

Введение

Прецизионные измерения слабых магнитных полей составляют быстро развивающийся раздел метрологии, находящий множество применений как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. Первые опыты по разработке прецизионных низкочастотных индукционных датчиков магнитного поля были выполнены в Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) в первой половине 1980-х годов и с различным темпом продолжают по настоящее время.

В 1980 г. была введена в эксплуатацию новая мощная коротковолновая станция для модификации ионосферы – стенд «СУРА». Одной из актуальных задач того времени была попытка генерации искусственных геомагнитных пульсаций при воздействии на ионосферу мощным модулированным коротковолновым радиоизлучением. Для регистрации искусственных сигналов был спроектирован и изготовлен индукционный магнитный датчик с очень низкими собственными шумами на частотах в районе и ниже первого шумановского резонанса. В результате была решена задача уверенной регистрации короткопериодных искусственных геомагнитных пульсаций.

Параллельно в проводимых экспериментах была обнаружена так называемая резонансная структура спектра (РСС) регулярного шумового фона, связанная с ионосферным альвеновским резонатором (ИАР). В дальнейших исследованиях было установлено, что РСС наряду с шумановским резонансом является регулярно наблюдаемой

фундаментальной характеристикой низкочастотного шумового фона, создаваемого грозами. С тех пор на полигоне НИРФИ “Новая жизнь” (д. Новая жизнь Воротынского района Нижегородской области) ведется регистрация регулярного электромагнитного шумового фона в цифровом виде. Для целей мониторинга был разработан специальный индукционный датчик с относительно узкой полосой частот в районе и несколько ниже первого шумановского резонанса, который работает по настоящее время. В течение обсуждаемого выше этапа работ ключевую роль в разработке индукционных датчиков сыграл научный сотрудник НИРФИ Павел Петрович Беляев.

Оценивая первый этап работ в целом, следует отметить, что постановка задачи приема слабых искусственных сигналов потребовала разработки индукционных датчиков с собственными шумами ниже минимального уровня регулярного шумового фона, что и определило успех как активных, так и пассивных экспериментов (генерация искусственных геомагнитных пульсаций, обнаружение РСС).

Есть еще одна важная задача, для которой необходимо “видеть” минимальный регулярный шумовой фон в очень широкой области частот, – это так называемое аудиоманнитотеллурическое зондирование (АМТЗ) Земли. В отличие от экспериментов, описанных выше, АМТЗ предъявляет к индукционным датчикам магнитного поля гораздо более жесткие метрологические и эксплуатационные требования. Поэтому разработка датчиков для целей АМТЗ потребовала тестирования и доводки последних в полевых условиях реальных геофизических работ. Эта работа была поставлена и выполнена в кооперации НИРФИ с ООО “ВЕГА” (г. Санкт-Петербург).

Современные индукционные магнитометры

Среди многочисленных типов датчиков магнитного поля индукционные датчики выделяются по простоте конструкции, технологии изготовления, доступности материалов и эксплуатационной надежности. В последнее время достигнут значительный прогресс в области повышения метрологических характеристик индукционных магнитометров и расширения частотного диапазона их работы.

На современном международном рынке средств магнитометрии индукционные датчики представлены достаточно широко. Приведем краткое описание наиболее известных моделей датчиков, получивших широкое распространение при проведении исследовательских и поисковых работ в России.

Немецкая фирма Metronix [Metronix, 2015] предлагает линейку из двух широкополосных датчиков: низкочастотного датчика MFS-06 [Flyer-06e, 2015] и высокочастотного MFS-07 [Flyer-07e, 2015]. Технические характеристики датчика MFS-06 достаточно уникальны в своем классе, что позволяет использовать его в широком круге задач. Из-за наличия отрицательной обратной связи по полю датчик обладает широким частотным диапазоном (от 1/4000 Гц до 10 кГц), высокой степенью линейности преобразования и стабильностью передаточной функции, а также сверхнизкими шумами и возможностью проведения внутренней калибровки. Плоский участок амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), при великолепных шумовых характеристиках, находится в диапазоне от 4 Гц до примерно 8 кГц. Длина датчика 1250 мм при диаметре 75 мм и весе 8.5 кг.

Более высокочастотный индукционный магнитометр MFS-07 в основном предназначен для измерений в диапазоне звуковых частот, при АМТЗ и зондировании Земли в диапазоне звуковых частот с управляемым источником. Тем не менее устройство работает в широком диапазоне частот – от 0.001 Гц до 50 кГц и может применяться в стандартном магнитотеллурическом зондировании (МТЗ).

Датчик MFS-07 обладает исключительно низкими шумами, малым температурным дрейфом входного напряжения смещения и входного тока смещения, а также очень стабильной передаточной функцией по температуре и времени. Встроенная функция калибровки облегчает выполнение пользователем калибровки датчика в полевых условиях или испытания его передаточной функции. Плоский участок АЧХ начинается с 32 Гц. Датчик имеет габариты 800 мм в длину при диаметре 75 мм и весит 5.5 кг.

Семейство индукционных магнитометров канадской компании Phoenix Geophysics [*Phoenix_home*, 2015; *Phoenix_products*, 2015] представлено двумя типами широкополосных датчиков – низкочастотным МТС-50 и высокочастотным АМТС-30. Датчики предназначены для работы в составе магнитотеллурических установок производства этой же компании. Приведенные на её сайте технические характеристики указанных датчиков весьма обрывочны.

Низкочастотный датчик МТС-50 имеет в длину 1410 мм при диаметре 60 мм. Частотный диапазон датчика от 0.0002 Гц до 400 Гц. Как можно понять из приведенных на сайте компании амплитудно-частотных и фазо-частотных (ФЧХ) характеристик, у датчика отсутствует обратная связь (ОС) по полю, что приводит к существенным неоднородностям АЧХ и ФЧХ, затрудняет обработку данных и ухудшает стабильность его характеристик. Высокочастотный датчик АМТС-30 имеет длину 820 мм при диаметре 60 мм. Частотный диапазон датчика от 1 Гц до 10 кГц.

Продукция американской фирмы Zonge [*Zonge*, 2015] представлена тремя типами датчиков. Датчик ANT/4 – самый низкочастотный в серии. Он имеет длину 1380 мм при диаметре 48 мм и весе 6.2 кг. На плоском участке АЧХ 0.1 Гц – 1 кГц датчик имеет чувствительность 100 мВ/нТл. Датчик ANT/6 – среднечастотный, широкополосный при длине 910 мм и диаметре 48 мм весит 3.2 кг, плоский участок АЧХ имеет диапазон от 10 Гц до 10 кГц. Датчик ANT/5 – самый маленький и легкий в серии (610 мм при диаметре 36 мм и массе 1.5 кг) – предназначен для измерений в диапазоне 0.25 Гц – 10 кГц.

Магнитометры американской фирмы Schlumberger [*Schlumberger*, 2015] представлены линейкой из четырех датчиков BF-4, BF-6, BF-7 и BF-10, предназначенных для работы в различных диапазонах частот. Самый низкочастотный из них BF-4 имеет плоский участок АЧХ в диапазоне от 1 Гц до 700 Гц (рабочий диапазон 0.0001 Гц – 700 Гц) при длине 1420 мм и диаметре 60 мм весит 7.9 кг. Среднечастотный образец BF-10 имеет частотный диапазон от 0.1 Гц до 10 кГц при тех же габаритах и массе.

Датчики семейства LEMI разработаны Львовским центром Института космических исследований НАН и НАК Украины и представлены на рынке довольно широким спектром специализированных преобразователей. Магнитометр LEMI-120 [*LEMI-120*, 2015] характеризуется исключительно низким уровнем шумов и широким динамическим частотным диапазоном, что делает его пригодным для различных применений в геофизике. Датчик LEMI-120 имеет длину 1340 мм при диаметре 85 мм и массе 6 кг. Он характеризуется достаточно высокой чувствительностью и работает в частотном диапазоне 0.0001–1000 Гц. Индукционный магнитометр LEMI-118 [*LEMI-118*, 2015] представляет собой среднечастотный датчик для полосы частот 1–70000 Гц. Его длина 800 мм и масса 1.7 кг.

На российском рынке до последнего времени практически отсутствовало предложение отечественных индукционных магнитометров высокого класса. Из таковых можно, например, упомянуть датчик NB0195_7 [*NVLab*, 2015] разработки ООО НПО ЭНТ (г. Санкт-Петербург). Он имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику с частотой среза 0.5 Гц и достаточно низкий уровень собственного шума, что позволяет использовать его для геологоразведочных работ методом АМТЗ. Датчик размещен в прочном водонепроницаемом стеклотекстолитовом корпусе трубчатой формы длиной 1110 мм, диаметром 70 мм и имеет массу 4.8 кг. Он является базовой моделью серии,

объединенной общими конструктивными решениями, и предназначен для работы в диапазоне частот от 0.001 Гц до 20 кГц.

В работе [Колобов и др., 2011] описана высокочувствительная измерительная станция КВВН-7, использующая магнитные датчики отечественной разработки и позволяющая одинаково эффективно выполнять частотное зондирование с контролируемым источником и АМТЗ в поле естественных вариаций в широком спектре частот (0.1–2000 Гц). Применение станции КВВН-7 позволяет с высоким разрешением исследовать электропроводность и флюидный режим верхней части земной коры для решения как геологических задач, так и задач электромагнитного мониторинга сейсмоопасных территорий в комплексе с сейсмическими методами.

В последние годы в результате кооперации НИРФИ (г. Нижний Новгород) и ООО “ВЕГА” (г. Санкт Петербург) были разработаны современные индукционные датчики для геофизических применений в широком диапазоне частот IMS-007, IMS-008 и IMS-009. Подробные описания конструкции и технических характеристик этих датчиков приведены ниже.

Основные методы и особенности проектирования и тестирования современных индукционных датчиков

Индукционный метод измерения переменного магнитного поля базируется на законе электромагнитной индукции Фарадея. Ферромагнитный сердечник искажает измеряемое магнитное поле, концентрируя в себе магнитные силовые линии и, в конечном итоге, увеличивая магнитный поток, сцепленный с витками измерительной катушки. Напряжение U_d на выходе индукционного преобразователя для внешнего магнитного поля H , меняющегося по гармоническому закону с циклической частотой ω , задается следующим соотношением:

$$U_d = i\omega\mu_{\text{эфф}}\mu_0NH_0S. \quad (1)$$

Конструктивно индукционный датчик представляет собой катушку индуктивности с сердечником из ферромагнитного материала (рис. 1) в одном корпусе вместе с предварительным усилителем.

В уравнении (1) и на рис. 1: i – мнимая единица; $\mu_{\text{эфф}}$ – эффективная магнитная проницаемость сердечника; $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; N – количество витков в катушке; l – длина сердечника; l_k – длина катушки; $S=\pi d^2/4$ – площадь сечения сердечника; H_0 – амплитуда напряженности магнитного поля; d – диаметр сердечника; D – внешний диаметр катушки.

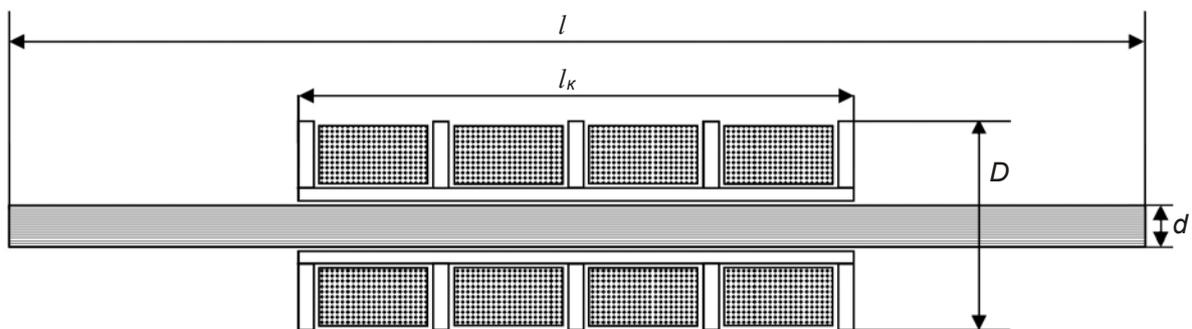


Рис. 1. Элементы конструкции индукционного датчика магнитного поля

Эффективное значение магнитной проницаемости сердечника $\mu_{\text{эфф}}$ определяется не только магнитной проницаемостью материала сердечника μ , но в большей степени –

его геометрическими размерами. Этот факт можно пояснить, используя электростатическую аналогию или введение фиктивных магнитных зарядов. Сердечник поляризуется во внешнем поле H_0 , и поляризационные заряды, возникающие на его концах, приводят к уменьшению поля внутри сердечника. Точное решение этой задачи найдено лишь для сердечника в форме эллипсоида [Bozorth, 1951]:

$$\mu_{\text{эфф}}^* = \frac{\mu}{1 + K(\mu - 1)}, \tag{2}$$

где K – геометрический фактор, определяемый выражением (3):

$$K = \left(\frac{d}{l}\right)^2 \left[\ln\left(2 \frac{l}{d}\right) - 1 \right]. \tag{3}$$

Существует еще один неучтенный параметр – неоднородность распределения магнитного поля по длине датчика. Полученное решение соответствует центральному сечению сердечника, но по направлению к торцам индукция магнитного поля снижается. Многовитковая измерительная катушка обычно занимает значительную часть длины сердечника, поэтому для расчета датчика формул (2) и (3) недостаточно, необходимо выбирать некоторое усредненное значение $\mu_{\text{эфф}}$ по длине сердечника, занимаемого, катушкой (только тогда мы имеем право умножать на количество витков в формуле (1)).

Экспериментальная проверка подтвердила правильность и хорошую точность следующей инженерной формулы для средней действующей эффективной проводимости $\mu_{\text{эфф}}$, полученной в работе [Зимин и др., 1985]:

$$\mu_{\text{эфф}} = \frac{\mu_{\text{эфф}}^* \left[1 - 0.255 \left(\frac{l_k}{l}\right)^2 \right]}{1 + 0.975 \left(\frac{S}{l^2}\right) \left[\ln\left(\sqrt{\pi} \frac{l^2}{S}\right) - 1 \right] (\mu_{\text{эфф}}^* - 1)}. \tag{4}$$

Расчеты, выполненные по приведенным формулам, показывают, что требования, предъявляемые к магнитной проницаемости материала, не являются слишком жесткими, если только сердечник не очень длинный. На рис. 2 представлены результаты расчета зависимости величины $\mu_{\text{эфф}}$ от магнитной проницаемости материала μ для трех значений длины сердечника: 120 см (низкочастотный датчик), 60 см (средние частоты) и 30 см (высокие частоты). Диаметр сердечника во всех случаях равен 10 мм, а катушка занимает половину длины сердечника и расположена по центру.

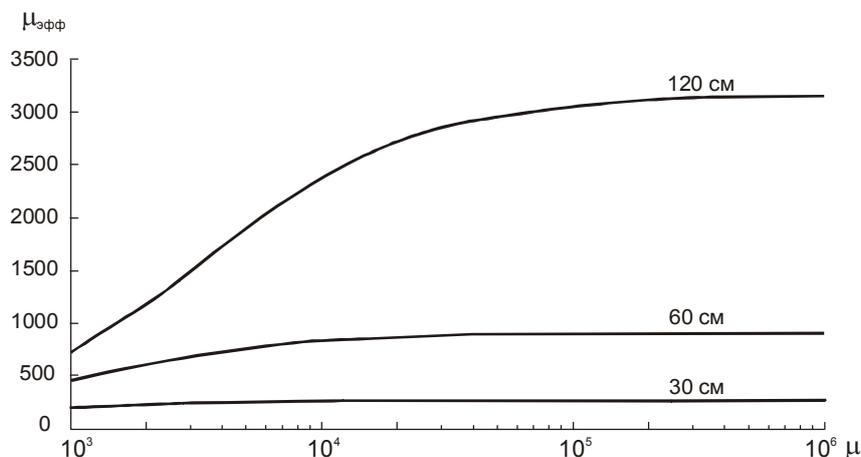


Рис. 2. Зависимость эффективной магнитной проницаемости сердечника $\mu_{\text{эфф}}$ от относительной магнитной проницаемости материала μ для $l=120, 60$ и 30 см (диаметр сердечника 10 мм)

Результаты расчета показывают, что требования к величине относительной магнитной проницаемости материала возрастают с увеличением отношения длины сердечника к его диаметру, и для достижения максимальной эффективной магнитной проницаемости “длинного” сердечника с $L=120$ см (низкие частоты) необходимо использовать материал с проницаемостью в десятки тысяч.

Кроме больших величин относительной магнитной проницаемости, от сердечника не в меньшей степени требуется отсутствие тепловых потерь, вызываемых токами Фуко во всей полосе частот. Это обеспечивает минимум электромагнитных шумов датчика, связанных с активной составляющей его импеданса. Исторически сердечники для индукционных датчиков изготавливались из специальных марок низкопроводящих ферритов (сердечник из феррита использован, например, в датчиках MFS компании Metronix). Такие сердечники имеют минимальные тепловые потери, но значения магнитной проницаемости недостаточно велики (типичное значение $\sim 10\,000$).

Материалы с указанными выше свойствами в настоящее время вполне доступны. При этом наибольшее распространение получили слоистые сердечники, спрессованные из тонкой ленты магнитомягких (петля гистерезиса материалов должна быть как можно более узкой) аморфных сплавов [Ferrite, 2015].

В формулу (1) входит величина $S_{\text{эфф}} = \mu_{\text{эфф}} S$, задающая степень концентрации сердечника по магнитному полю; назовем ее эффективной площадью сердечника. Эта величина в основном определяется геометрическими размерами сердечника и катушки.

На рис. 3–5 графически представлены зависимости этой величины от длины и диаметра сердечника, а также от коэффициента заполнения витками катушки всей длины сердечника $\chi = l_k/l$, соответственно. Расчеты показывают, что наиболее эффективным способом увеличения выходного сигнала датчика, а с ним и его чувствительности, является увеличение длины сердечника.

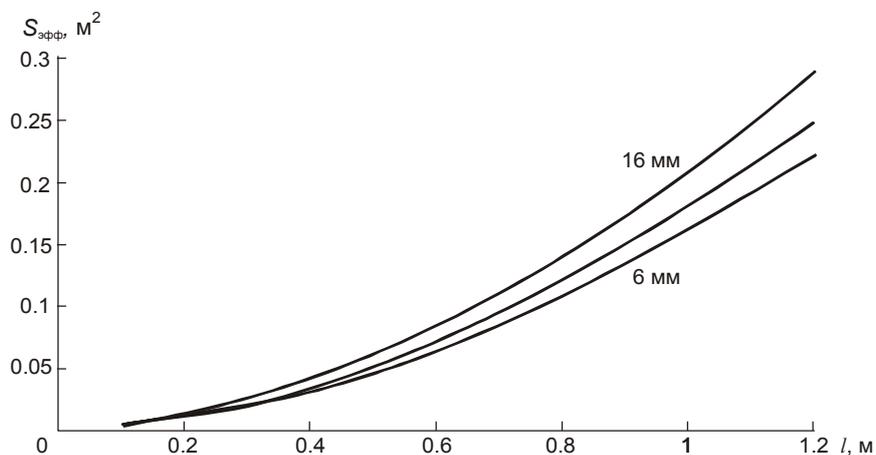


Рис. 3. Зависимость величины $S_{\text{эфф}}$ сердечника от его длины в метрах для диаметра сердечника 6, 10 и 16 мм

Естественным ограничителем здесь являются габариты и масса датчика. Проводить работы продолжительное время в полевых условиях громоздкими и тяжелыми датчиками крайне неудобно. Широко распространенные низкочастотные датчики имеют характерную длину около 1 м при массе до 10 кг. В то же время, длину датчиков, стационарно устанавливаемых на научных полигонах и обсерваториях, желательно увеличить.

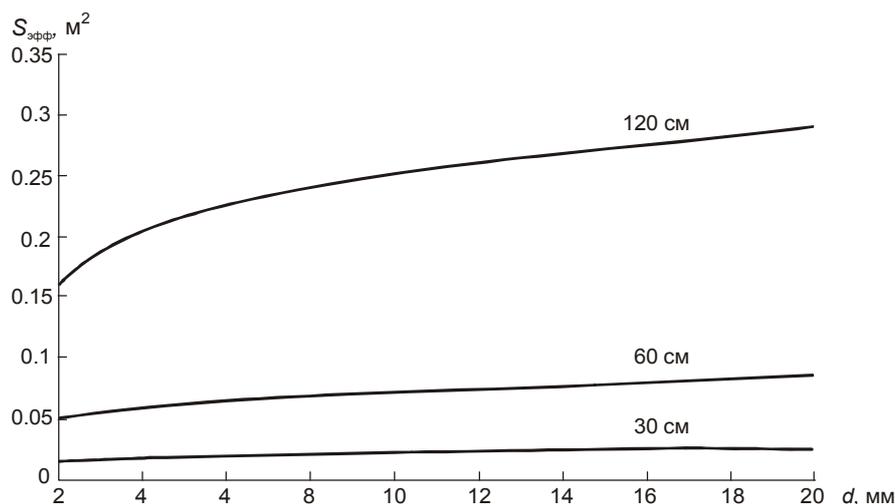


Рис. 4. Зависимость величины $S_{эфф}$ сердечника от его диаметра в миллиметрах для длины сердечника 120, 60 и 30 см

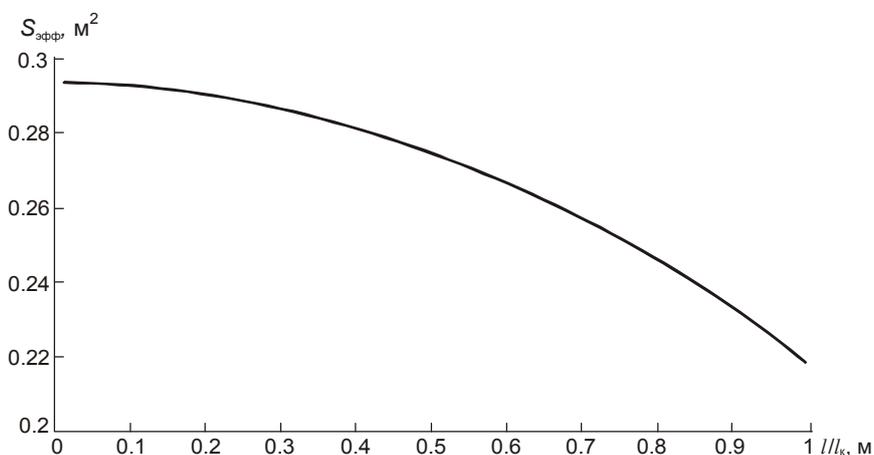


Рис. 5. Зависимость $S_{эфф}$ сердечника от коэффициента заполнения $\chi = l_к/l$ для сердечника длиной 120 см и диаметром 16 мм

Как показано на рис. 4, эффективная площадь сердечника, а с ней и уровень выходного сигнала датчика, растет и при увеличении диаметра сердечника. Но это не лучший способ повышения чувствительности, поскольку эта зависимость весьма слабая, а увеличение диаметра приводит к росту диаметра витков приемной катушки, увеличению ее сопротивления и, соответственно, шумов.

На рис. 5 достаточно очевидно иллюстрируется тот факт, что при разработке датчика необходимо стремиться к минимальному значению коэффициента заполнения. В известных нам датчиках этот параметр варьируется в пределах $\chi = 0.3-0.6$. Входящее в формулу (1) количество витков N также является одним из наиболее значимых параметров датчика, определяющим его частотные свойства (ширину полосы), собственные шумы и предельную чувствительность. На кривых, представленных на рис. 3–5 присутствуют области сильных и слабых зависимостей, что позволяет при разработке, варьируя эти параметры, получить оптимальные массогабаритные и метрологические характеристики датчиков.

Амплитудно-частотная характеристика идеального датчика, согласно уравнению (1), представляла бы собой линейно растущую функцию при абсолютно плоской фазовой характеристике с постоянным сдвигом фаз $\pi/2$. Однако это справедливо только для

самых низких частот диапазона. С повышением частоты начинают сказываться резонансные явления в электромагнитном контуре, образованном индуктивностью катушки датчика L и суммарной емкостью цепей датчика и входа усилителя $C=C_D+C_{ВХ}$.

На рис. 6, а представлена импедансная схема подключения датчика к усилителю. Здесь L – индуктивность приемной катушки, R – ее активное сопротивление, C_D – распределенная межвитковая емкость катушки в сумме с другими паразитными емкостями датчика (емкость катушка–сердечник, катушка–экран и т.д.), $C_{ВХ}$ и $R_{ВХ}$ – входные емкость и сопротивление усилителя.

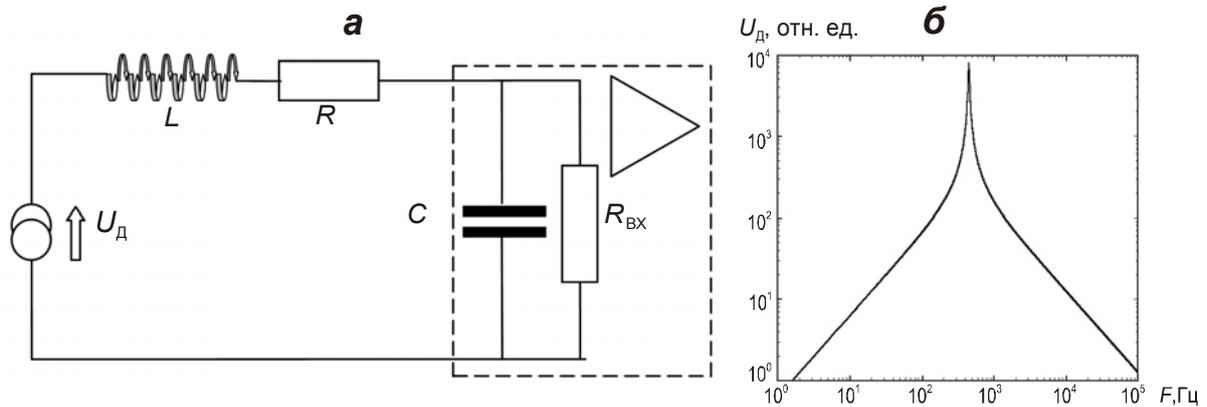


Рис. 6. Импедансная схема подключения датчика к усилителю (а) и АЧХ датчика в относительных единицах (б)

При этом входящие в схему элементы будут иметь следующие комплексные импедансы, образующие частотно зависимый делитель напряжения:

$$\begin{aligned} Z_L &= i\omega L; \quad Z_R = R; \quad Z_C = 1/i\omega C, \\ Z_{ВХ} &= Z_C R_{ВХ} / (Z_C + R_{ВХ}). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $Z_{ВХ}$ – входной импеданс усилителя. Напряжение сигнала непосредственно на входе усилителя $U_{ВХ}$ будет равно:

$$U_{ВХ} = \frac{Z_{ВХ}}{(Z_L + Z_R + Z_{ВХ})} U_D = P(\omega) U_D, \quad (6)$$

где $P(\omega)$ – комплексный частотно-зависимый коэффициент передачи.

Амплитудно-частотная характеристика описанных датчиков представляет собой резонансную кривую (рис. 6, б) с линейным ростом амплитуды с частотой на низких частотах и спадом на частотах выше резонансной, вызванным паразитной емкостью обмотки и входной емкостью усилителя. Окончательное выражение для амплитуды полезного сигнала датчика, приведенного ко входу усилителя, при этом примет вид:

$$U_{ВХ} = P(\omega)\omega\mu_0\mu_{эфф}SNH_0. \quad (7)$$

При проведении измерений естественного электромагнитного поля в широком диапазоне частот такая характеристика дает некоторый выигрыш в отношении сигнал/шум, поскольку естественный электромагнитный шум имеет резко выраженную частотную зависимость вида $H_0 \sim 1/f^\alpha$. В интересующем нас частотном диапазоне α меняется в диапазоне от 0.5 до 1.5. Исходя из этого требования к динамическому диапазону приемной аппаратуры на низких частотах в этом случае резко снижаются [Александров и др., 1972; Ремизов, 1985].

Однако, для того чтобы получить плоскую амплитудно-частотную характеристику в широком частотном диапазоне, а также минимизировать влияние особенностей каждого конкретного датчика и повысить устойчивость их работы, применяют отрицательную обратную связь по полю. Этот прием использован практически во всех современных конструкциях индукционных датчиков.

На рис. 7, а приведена структурная схема такого подключения, а на рис. 7, б, в – АЧХ датчика для различных коэффициентов усиления и различных значений сопротивления в петле обратной связи. На рис. 7, г показано изменение ФЧХ датчика при изменении глубины обратной связи.

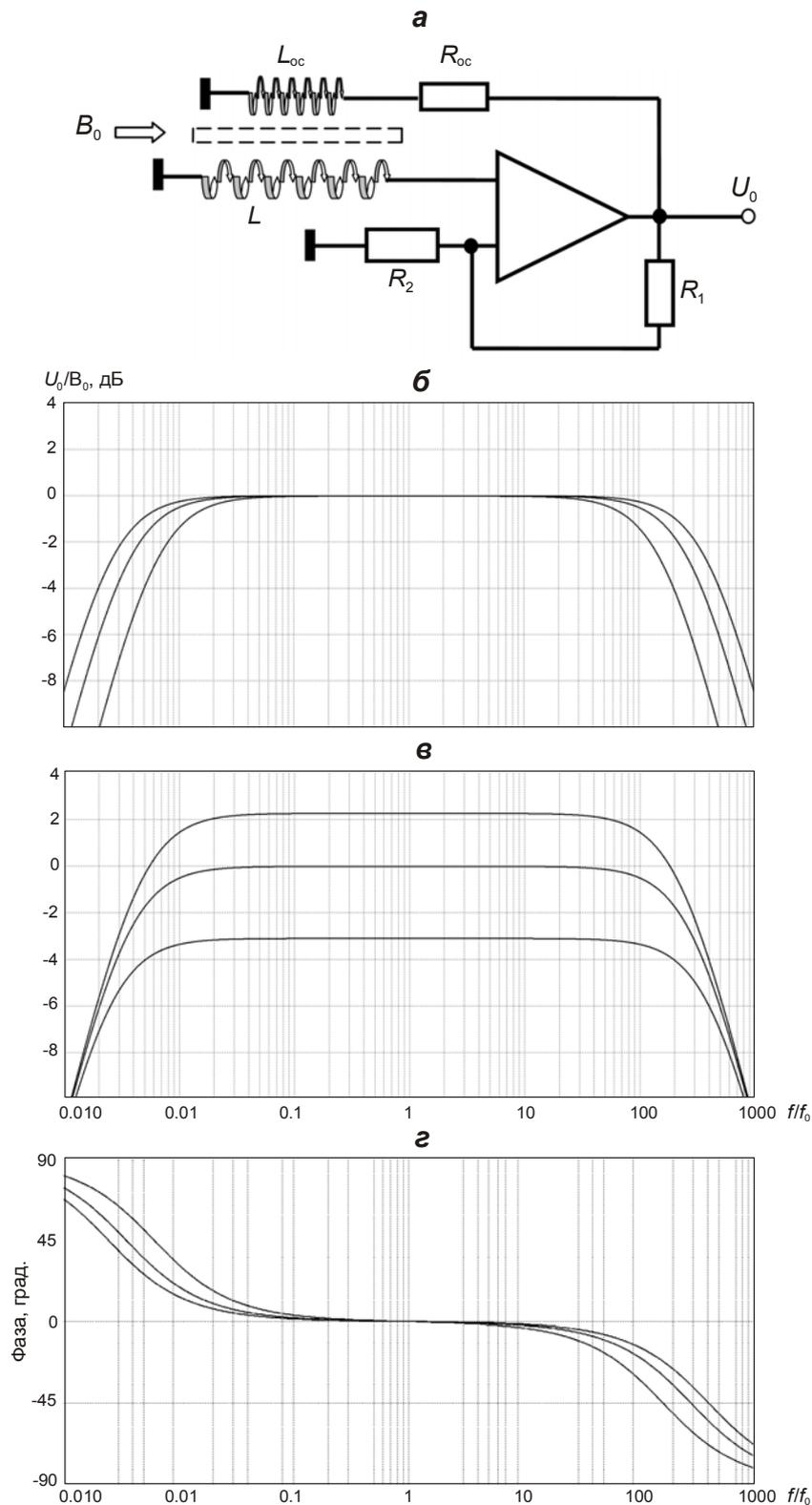


Рис. 7. Структурная схема подключения обратной связи (а), АЧХ датчика при различных коэффициентах усиления в петле обратной связи k_{oc} (б) и различных значениях резистора R_{oc} (в) и влияние на ФЧХ датчика (г)

Как видно на рис. 7, а-г, на АЧХ датчиков образуется обширный участок с плоской характеристикой, удобный при обработке результатов измерений, однако ФЧХ датчика при этом становится нелинейной (рис. 7, з).

Влияние коэффициента усиления в петле обратной связи и величины резистора в цепи обратной связи на АЧХ датчика несколько различны. Более высокому коэффициенту усиления соответствует более широкая полоса пропускания при неизменном коэффициенте передачи на плоском участке. Увеличение сопротивления резистора R_{oc} сужает плоский участок, при одновременном увеличении коэффициента передачи.

Комплексная передаточная функция датчика с усилителем и обратной связью по полю обсуждается в ряде работ. Так, в работе [Séran et al., 2005] получено следующее выражение для чувствительности датчика (отношения амплитуды сигнала на выходе усилителя U_0 к амплитуде вариации индукции магнитного поля B_0):

$$\frac{U_0}{B_0} = \frac{-i\omega\mu_{эфф}NSk_{oc}}{1 + i\omega\left(RC + \frac{k_{oc}M}{R_{oc}}\right) - LC\omega^2}. \quad (8)$$

В формуле (8) k_{oc} – коэффициент усиления в петле обратной связи; R – активное сопротивление катушки датчика; C – суммарная емкость на входе усилителя; L – индуктивность основной катушки датчика; R_{oc} – сопротивление в цепи обратной связи и M – взаимная индуктивность катушки датчика и катушки обратной связи, зависящая от их конструктивных параметров и соотношения числа витков.

Частота на рис. 7, б-г нормирована относительно частоты резонанса:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \omega_0 = 2\pi f_0, \quad (9)$$

а на плоской амплитудно-частотной характеристике возникают низкочастотный и высокочастотный спады по уровню 0.707 на частотах f_1 в области низких частот и f_2 в области высоких частот, связанные с параметрами цепи следующим образом [Séran et al., 2005]:

$$f_1 = \frac{R_{oc}}{2\pi k_{oc}M}, \quad f_2 = \frac{k_{oc}M}{2\pi R_{oc}LC}. \quad (10)$$

Для расчетов электротехнических параметров цепи обычно используется ряд полупырических формул с различными поправочными коэффициентами. В обзорной статье [Tumansky, 2007], например, для расчета индуктивности катушки датчика и взаимной индуктивности приводятся следующие соотношения:

$$L = \mu_0\mu_{эфф} \frac{N^2S}{l} \lambda, \quad \lambda = 1.85 - 1.1\chi, \quad M = \mu_0\mu_{эфф} \frac{NN_{oc}S}{l} \lambda, \quad (11)$$

где λ – поправочный коэффициент; χ – коэффициент заполнения сердечника, а N_{oc} – число витков в катушке обратной связи.

В указанных работах авторы приводят ряд эмпирических формул для расчета емкостей датчика. Однако, следует заметить, что основной вклад в суммарную емкость на входе предварительного усилителя вносит входная емкость самого усилителя и цепей защиты датчика от высокочастотных радиопомех, что дает в сумме около 200 пФ.

Тогда чувствительность датчика на плоском участке АЧХ можно оценить по следующей простой формуле [Séran et al., 2005]:

$$\frac{U_0}{B_0} = R_{oc} \frac{l}{\mu_0 N_{oc} \lambda}. \quad (12)$$

Окончательное значение чувствительности датчика на плоском участке, требуемое для оптимального согласования электронной схемы датчика с устройством реги-

страции (АЦП) по динамическому диапазону, может быть получено дополнительным усилением в каскадах после петли обратной связи. Там же, при необходимости, может быть введена дополнительная частотная коррекция. Последние каскады предварительного усилителя обычно представляют собой кабельные усилители с дифференциальным выходом.

Необходимо отчетливо представлять себе, что чувствительность датчика, а также его АЧХ, являются вспомогательными параметрами, определяющими удобство работы с конкретным источником сигнала в определенном месте измерений, характеризующимся уровнем местных индустриальных помех. Наиболее значимой характеристикой датчиков является их предельная чувствительность, то есть минимальный уровень сигнала, который способен зарегистрировать данный датчик. Эта характеристика в основном определяется уровнем собственных шумов датчика. В общем случае шумы прибора зависят от их источника и характеризуются своим частотным спектром. Рассмотрим кратко основные виды шумов и параметры, количественно характеризующие их величины.

Обратная связь действует одинаковым образом, как на полезный сигнал, так и на шум на входе усилителя, поэтому, на отношение сигнал–шум, в первом приближении, она влияния не оказывает, и предельные параметры датчика могут быть получены из соотношения сигнал/шум на входе усилителя с использованием выражения (7) для амплитуды полезного сигнала.

Тепловой шум. Любой резистор на плате усилителя, р-п переход транзистора, активное сопротивление датчика и т.д. генерируют некоторое шумовое напряжение в широком спектральном диапазоне (белый шум). Напряжение шума в незамкнутой цепи, определяется только активным сопротивлением источника R , и при температуре T спектральная плотность тепловых шумов определяется формулой:

$$u_T = (4kTR)^{1/2}, \quad (13)$$

где $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана. При комнатной температуре имеем оценку $u_T=1.27 \cdot 10^{-4} R^{1/2}$ мкВ/Гц^{1/2}, например, для $R=10$ кОм получим среднеквадратичное напряжение шума порядка $u_T \sim 13$ нВ/Гц^{1/2}.

Тепловые шумы, связанные с тепловыми потерями в сердечнике, до последнего времени были основным фактором, ограничивающим возможности датчиков на высоких частотах, поскольку, вследствие скин-эффекта, эффективная проницаемость сердечника становится комплексной, а тепловые потери определяются, так называемым, тангенсом угла потерь в сердечнике:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{пот}} = \frac{\operatorname{Im}(\mu_{\text{эфф}})}{\operatorname{Re}(\mu_{\text{эфф}})}. \quad (14)$$

При этом в формулу импеданса датчика к сопротивлению катушки R добавляется величина $R_{\text{пот}} = \omega L \cdot \operatorname{tg} \delta_{\text{пот}}$, а соответствующее дополнительное шумовое напряжение, обусловленное тепловыми потерями в сердечнике, также вычисляется по формуле Найквиста (13) с заменой R на $R_{\text{пот}}$. Необходимо иметь в виду, что для оценки таких потерь, необходимо использовать не паспортную величину тангенса потерь (поскольку она относится лишь к материалу, из которого изготовлен сердечник), а экспериментально измеренную величину для конкретного сердечника со своими геометрическими параметрами и технологическими особенностями.

Применение современных материалов при изготовлении сердечников (ферриты, слоистые сердечники из тонкой ленты аморфных сплавов) позволило значительно снизить влияние таких шумовых факторов. Измерения шумов, проведенные для использованных нами сердечников, показали, что вплоть до частоты около ста кГц, тепловыми шумами сердечника можно пренебречь.

Шумы предварительного усилителя. На рис. 8 приведена эквивалентная шумовая схема датчика с предварительным усилителем. Здесь $e_{ш}$ обозначает источник шума напряжения, последовательный по отношению к входному сигналу, а $i_{ш}$ обозначает шум входного тока усилителя, который предполагается идеальным. Таким образом, полное напряжение шума усилителя, приведенное к его входу, будет равно (Z – здесь модуль полного импеданса датчика):

$$u_{ш} = [e_{ш}^2 + (Zi_{ш})^2]^{1/2}. \quad (15)$$

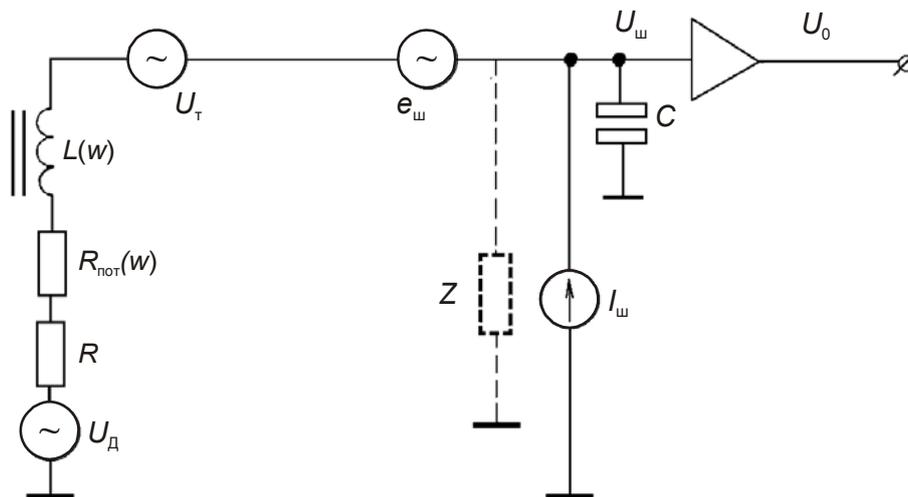


Рис. 8. Эквивалентная шумовая схема датчика с предварительным усилителем

Слагаемые в скобках (15) – это входное напряжение шума усилителя и напряжение шума, порождаемое прохождением входного шумового тока усилителя через импеданс источника. При малом сопротивлении источника сигнала преобладает шум напряжения $e_{ш}$, а при большом – шум тока $Zi_{ш}$. Величины $e_{ш}$ и $i_{ш}$ представляют собой характеристики транзисторов или ОУ, используемых при построении предварительных усилителей. Они могут быть выбраны оптимальным образом при проработке схемотехники, выборе элементной базы и рабочих токов.

Поскольку, индукционный датчик относится к источнику с большим внутренним сопротивлением, то в качестве входных элементов предварительного усилителя используют полевые транзисторы с очень малым значением шумового тока (единицы $\text{фА}/(\text{Гц})^{1/2}$). Согласование датчика по шумам при этом сводится к выбору величины входного сопротивления усилителя, равным его шумовому сопротивлению $R_{вх} = e_{ш}/i_{ш}$.

Естественно, что это можно сделать только в узком диапазоне частот, например, там, где наблюдается минимум в спектре естественного геомагнитного поля, искаженного частотной характеристикой индукционного датчика. Наличие такого минимума в диапазоне частот 0.1–10 Гц было зафиксировано при обобщении многолетних экспериментальных данных [Александров и др., 1972; Ремизов, 1985]. На рис. 9 эти результаты отображены графически. Влияние собственных шумов наиболее сильно проявляется в области минимума на частотах $f \sim 1$ Гц.

Различные источники шума распределены по частотному диапазону неравномерно. Так, в самом нижнем участке частотного диапазона преобладают шумы напряжения усилителя и тепловые шумы активного сопротивления датчика, а на высоких частотах определяющими становятся токовые шумы усилителя и тепловые шумы потерь в сердечнике.

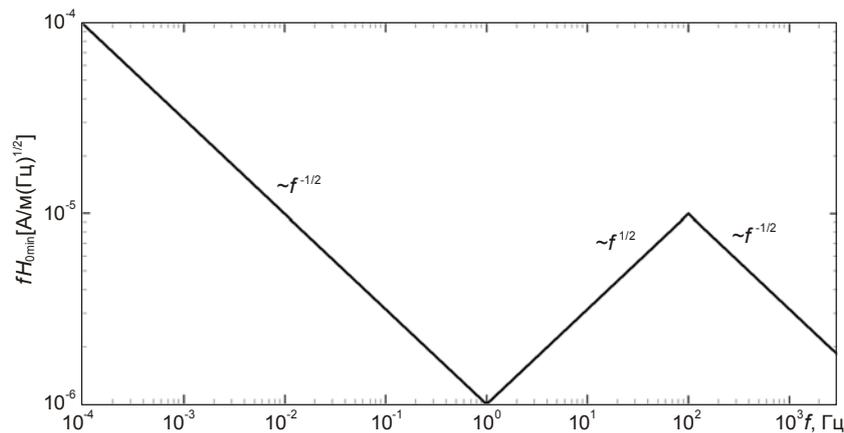


Рис. 9. Модель спектра минимального уровня геомагнитного фона, приведенная ко входу предварительного усилителя. АЧХ датчика учтена фактором f

Ранее основным фактором, ограничивавшим возможности датчиков на низких частотах, являлся фликкер-шум линейных усилителей. Для преодоления этих проблем были разработаны параметрические нелинейные усилители с модуляцией и демодуляцией сигнала (МДМ-усилители), в иностранной терминологии называемые “чопперы” (chopper) и широко используемые современными разработчиками. Непрерывное совершенствование схемотехники таких усилителей с применением новой элементной базы позволило снизить шумы напряжения до величин порядка единиц $\text{nV}/(\text{Гц})^{1/2}$. К сожалению, МДМ-усилители имеют большие токовые шумы (шумы переключения), что приводит к высоким уровням шума датчика на высоких частотах. В современных датчиках МДМ-усилители делают отключаемыми.

На высоких частотах (выше сотен Герц) современные линейные усилители имеют характерные шумы напряжения $1.5\text{--}2 \text{ nV}/\text{Гц}^{1/2}$ при токовом шуме единицы $\text{fA}/\text{Гц}^{1/2}$. Для сравнения, токовый шум МДМ-усилителя составляет сотни $\text{fA}/\text{Гц}^{1/2}$. Так как все упомянутые виды шумов не коррелированы, то полное шумовое напряжение $U_{\text{ш}}$ определяется следующим образом:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 Z^2 + 4kT(R + R_{\text{пот}})} . \tag{16}$$

Оценка предельной чувствительности магнитометра с усилителем определяется условием равенства величин полезного сигнала на входе усилителя и полного шума. Тогда минимальный регистрируемый сигнал можно вычислить по формуле:

$$B_{\text{min}}(f) = \frac{(e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 Z^2 + 4kT(R + R_{\text{пот}}))^{1/2}}{2\pi f \mu_{\text{эфф}} NS} . \tag{17}$$

Индукционные датчики для наземных геофизических исследований IMS 007, IMS 008 и IMS 009. Технические параметры и примеры использования

В последние годы в результате совместных работ ФГБНУ НИРФИ и ООО “ВЕГА” была разработана линейка современных малозумящих индукционных магнитометров: низкочастотный датчик IMS-008 и среднечастотные широкополосные IMS-007 и IMS-009. Данные магнитометры в настоящее время успешно используются как при проведении обсерваторских наблюдений, так и в полевых работах, в том числе в жестких условиях пустыни и крайнего Севера.

На рис. 10, а показан внешний вид комплекта датчиков IMS-007. Основные характеристики магнитометров IMS-007, IMS-008 и IMS-009 приведены в таблице.



Рис. 10. Внешний вид комплекта датчиков IMS-007 (а) и предварительный усилитель (б)

Характеристики датчиков серии IMS

Датчик	IMS-007	IMS-008	IMS-009	Примечание
Частотный диапазон	0.001 Гц – 10 кГц	0.0001 Гц – 1 кГц	0.001 Гц – 10 кГц	Возможность отключения МДМ
АЧХ	(4 Гц – 10 кГц) плоская (0.001 Гц – 4 Гц) линейно-растущая	(2 Гц – 1 кГц) плоская (0.0001 – 2 Гц) линейно-растущая	(4 Гц – 10 кГц) плоская (0.001 – 4 Гц) линейно-растущая	
Измеренный уровень шума	–	10^{-2} нТл/Гц ^{1/2} на 0.01 Гц ^{1/2} 10^{-4} нТл/Гц ^{1/2} на 1 Гц $5 \cdot 10^{-7}$ нТл/Гц ^{1/2} на 1 кГц	$2 \cdot 10^{-2}$ нТл/Гц ^{1/2} на 0.01 Гц $2 \cdot 10^{-4}$ нТл/Гц ^{1/2} на 1 Гц 10^{-6} нТл/Гц ^{1/2} на 1 кГц	
Чувствительность	–	0.8 (В/нТл)·Гц (0.0001 – 2 Гц) 1.6 В/нТ (2 Гц – 1 кГц)	0.2 (В/нТ)·Гц (0.001 Гц – 4 Гц) 0.8 В/нТ (4 Гц – 10 кГц)	
Диапазон выходного сигнала	±10 В	±10 В	±10 В	±2.5 В (опция)
Ток потребления	60 мА (при 12 В)	65 мА (при 12 В)	40 мА (при 12 В)	
Габариты				
длина	800 мм	1240 мм	800 мм	
диаметр	75 мм	75 мм	65 мм	
Масса	6 кг	8 кг	6 кг	
Рабочая температура	от –40 до +60 °С	от –40 до +60 °С	от –40 до +60 °С	

Низкие собственные шумы магнитометров позволяют при использовании градиентного метода измерений [Поляков и др., 2006] регистрировать сигналы, амплитуды которых много ниже составляющих естественного шумового фона. При совместном использовании магнитометры позволяют перекрыть диапазон частот от 0.0001 Гц до 10 кГц. Такая широкая полоса со стороны высоких частот достигнута благодаря использованию слоистых сердечников из аморфного сплава, секционированных катушек и других конструкционных особенностей, а со стороны низких частот – использованием

малошумящих МДМ-усилителей. Встроенная функция калибровки облегчает пользователям выполнение проверки передаточной функции магнитометра непосредственно в условиях эксперимента.

Датчики размещены в прочных водонепроницаемых стеклотекстолитовых трубах. Для защиты от механических воздействий корпус покрыт термоусаживаемой трубкой. С обеих сторон корпус герметично закрыт заглушками, на одной из которых установлен разъем для подключения соединительного кабеля. Малошумящий предварительный усилитель и буферный усилитель с дифференциальным выходом размещены в общем корпусе с преобразователем (см. рис. 10, б) и подключаются кабелем через разъем к системе регистрации и источнику питания.

Методики проведения проверок и испытаний датчиков

Проверки и испытания датчиков включают в себя лабораторные измерения шумов усилителя, предварительные грубые настройки их чувствительности и АЧХ. Окончательные настройки параметров датчиков выполняются на экспериментальных полигонах с низким уровнем промышленных помех. В качестве источника известного поля используются кольца Гельмгольца либо излучатель типа магнитного диполя, располагаемый на расстоянии 20–50 м от закрепленных на стендах датчиков.

Точные измерения чувствительности, АЧХ и ФЧХ датчиков производятся в нескольких точках рабочего диапазона частот. Для выявления возможных особенностей характеристик отдельных экземпляров во всем частотном диапазоне датчики облучаются белым шумом. Калибровка с использованием белого шума является удобным и быстрым методом качественного сравнения характеристик датчиков во всей полосе частот. На рис. 11, а, б приведены результаты тестирования трех экземпляров датчиков IMS-008 с применением белого шума.

Испытания на полигоне заканчиваются проведением параллельного теста, когда серия одинаковых датчиков устанавливается на стенде или в грунте параллельно друг другу, при этом производится одновременная запись естественного фона или искусственного сигнала. Такие проверки выполняются также в полевых условиях перед началом любых масштабных геофизических работ.

На рис. 12, а показан пример проведения параллельного теста 12 датчиков IMS-007 перед выполнением поисковых электроразведочных работ в пустыне, а на рис. 12, б представлен результат сравнения АЧХ шести датчиков IMS-007 после параллельного теста.

Помимо стандартных лабораторных и полигонных испытаний с измерением АЧХ и ФЧХ датчиков, несколько образцов магнитометров IMS-008 прошли метрологические тестирования на базе Отраслевого научно-методического метрологического центра ФГУНПП “Геологоразведка”. Целью экспериментальных работ было уточнение частотных характеристик датчиков, а также попытка определить реальный порог чувствительности разработанных индукционных магнитометров и линейность их коэффициента преобразования. Испытания проводились в несколько этапов с использованием экранированной двухкомпонентной меры магнитной индукции ЭДММИ.

Немагнитный павильон ФГУНПП “Геологоразведка” находится в 25 км от Санкт-Петербурга и построен с соблюдением всех нормативов, предъявляемых к строениям такого типа [Нечаев, 2006]. Калибровочная система установлена на изолированном от пола павильона цементном основании (рис. 13). Массивная алюминиевая плита, на которой смонтированы кольца Гельмгольца, изолирована от фундамента с помощью сложной системы гашения механических вибраций.

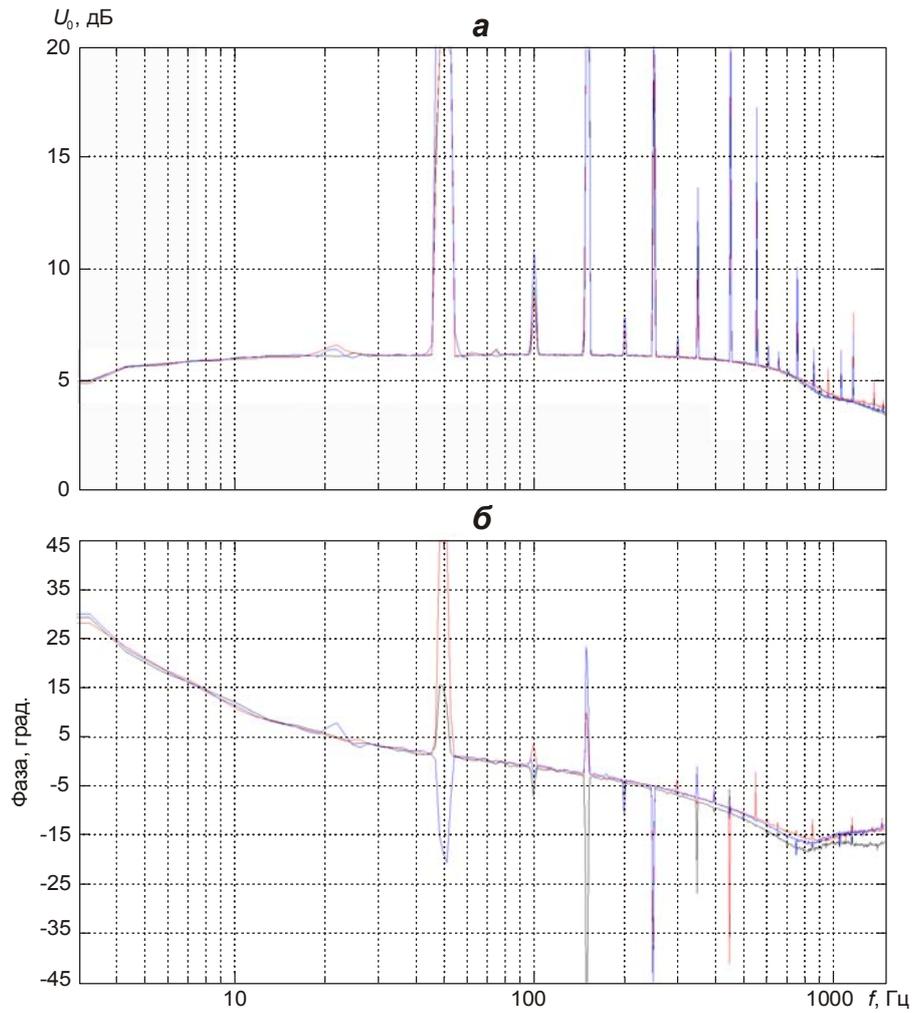


Рис. 11. АЧХ (а) и ФЧХ (б) трех датчиков IMS-008, измеренные с использованием белого шума

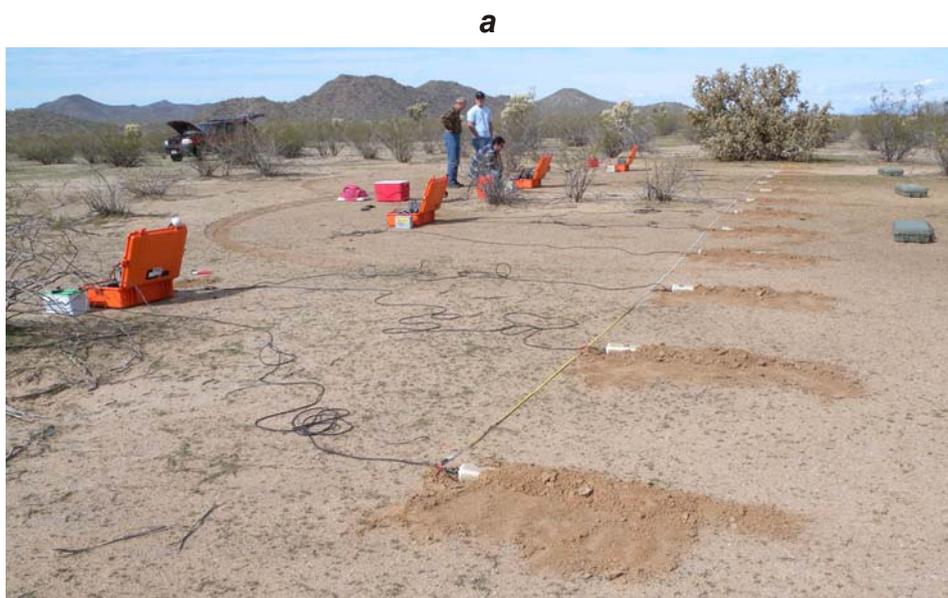


Рис. 12

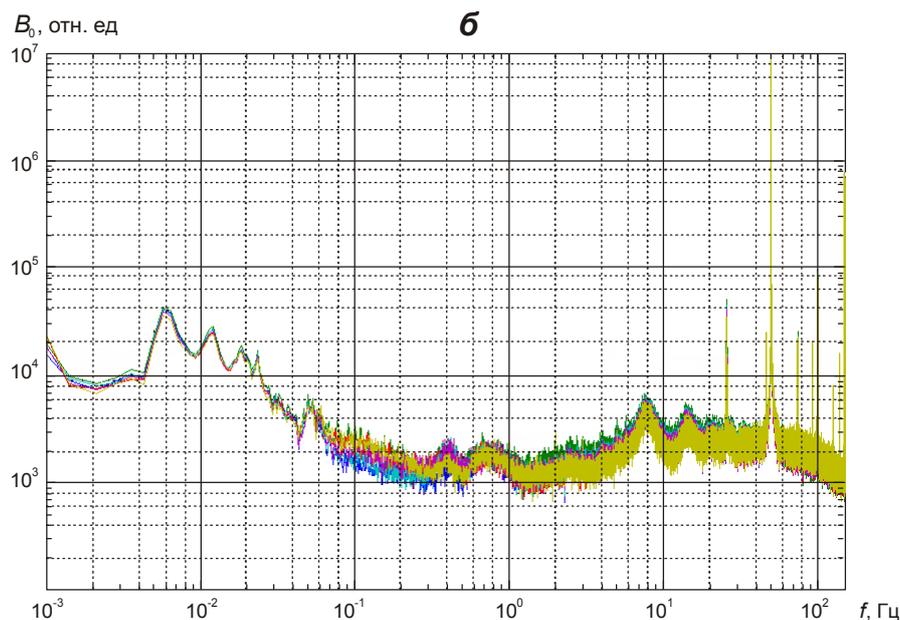


Рис. 12. Пример проведения параллельного теста датчиков IMS-007 по естественному фону (а) (штат Аризона, США); б – спектральная плотность естественного электромагнитного поля, измеренная шестью параллельно установленными датчиками



Рис. 13. Поверочный стенд в ФГУНПП “Геологоразведка”

В зоне однородного магнитного поля, формируемого кольцами Гельмгольца, расположен измерительный компенсационный феррозондовый магнитометр и многослойный пермаллоевый экран с дополнительными калибровочными обмотками. Такая установка позволяет подавлять внешние магнитные поля в широком диапазоне частот в области, предназначенной для тестируемого объекта с коэффициентом более чем 10^3 .

Для испытуемого магнитометра в “очищенном” объеме, одновременно с подавлением внешних полей, генерируется известное магнитное поле заданной частоты. Результаты измерений АЧХ и ФЧХ магнитных датчиков IMS-008 и IMS-008 представлены на рис. 14. Для сравнения показаны частотные характеристики известных в России датчиков МТС-50 фирмы Phoenix и феррозондового магнитометра Fluxgate.

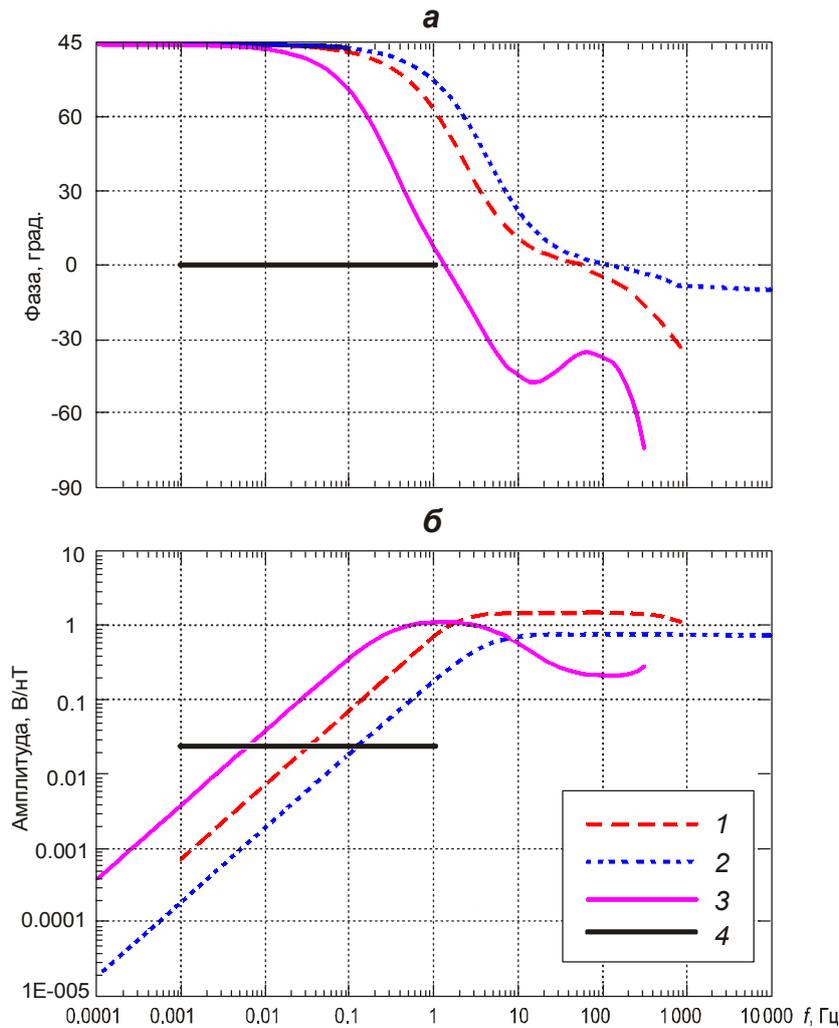


Рис. 14. ФЧХ (а) и АЧХ (б) магнитометров IMS-008 (1), IMS-009 (2), Phoenix МТС-50 (3) и Fluxgate (4)

Измерения коэффициента преобразования магнитного датчика в зависимости от уровня входного сигнала производились на нескольких частотах рабочего диапазона. Отклонение коэффициента преобразования от своего среднего значения, являющегося характеристикой линейности измерительной системы, не превышало 0.25 % в диапазоне входных сигналов от 5 пТл и выше.

Наибольшие сложности возникают при измерениях такой основополагающей характеристики датчика, как его предельной чувствительности, т.е. минимального уровня полезного сигнала, который может быть зарегистрирован данным магнитометром. Этот параметр определяется уровнем собственных шумов датчика.

Следует отметить, что общепринятых методик такой проверки до настоящего времени не существует. Оценку этих характеристик, например, можно сделать производя вычитание выходных сигналов двух или нескольких датчиков после проведения параллельного теста. Временной ряд, полученный вычитанием сигналов двух параллельных датчиков, представляет собой собственный шум датчика и некоррелированную помеху, например, паразитные сигналы ветра, дождя и сейсмик различного происхождения. Таким образом, можно получить оценку сверху (несколько заниженную) для предельной чувствительности магнитометра.

В нашем случае, на стенде, при значительном подавлении существующих промышленных помех, а также вариаций магнитного поля естественного происхождения, удалось произвести прямую оценку собственных шумов испытуемого образца. Средняя спектральная плотность шумов магнитного датчика IMS-008 в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц не превышала $12 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$.

На рис. 15 приведен пример измерения тестового сигнала с частотой 7.8 Гц и величиной 1 пТл на фоне шумов магнитного датчика IMS-008, помещенного в экранированную двухкомпонентную меру магнитной индукции ЭДММИ. Шумовой сигнал около 2.4 Гц соответствует собственной механической частоте колебаний метрологической установки.

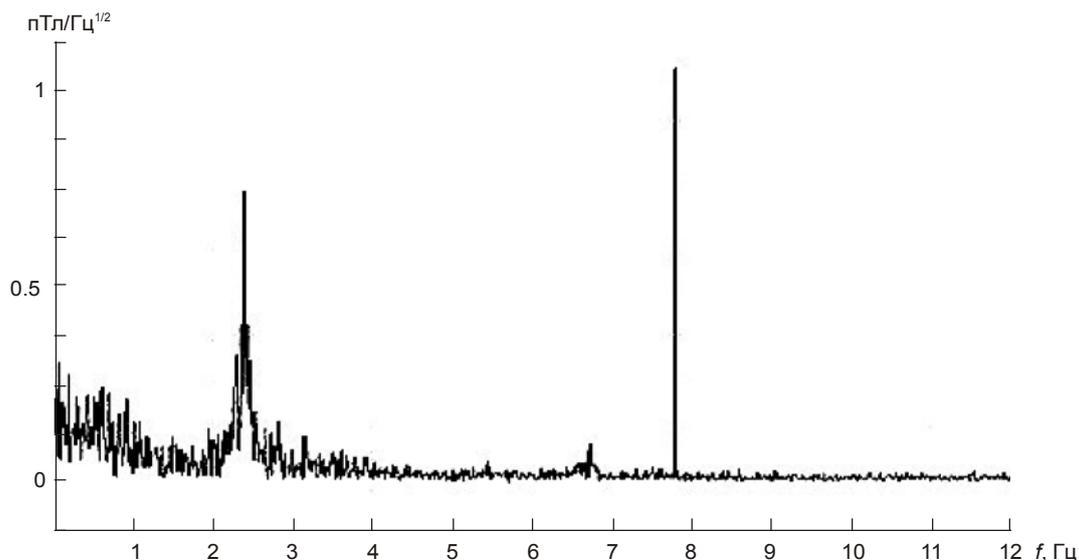


Рис. 15. Шумовой спектр магнитометра IMS-008

Необходимо отметить, что датчики IMS-008 в течение 2.5 лет непрерывно работали при проведении обсерваторских наблюдений. После окончания работ были проведены измерения АЧХ и ФЧХ датчиков. Выяснилось, что характеристики сохранились с очень большой точностью (менее 1 %). Результаты испытаний и долговременная работа в различных климатических условиях показали, что датчики IMS-008 и IMS-009 обладают высокой стабильностью параметров, исключительно низкими характеристиками шума, очень малым температурным дрейфом, а также стабильной передаточной функцией во времени и при различных температурах.

Примеры использования датчиков

В настоящее время индукционные магнитные датчики нашли широкое применение в различных областях науки и техники в основном благодаря высокой чувствительности и широкополосности при относительной простоте использования. В сравнении с другими прецизионными высокочувствительными магнитометрами, такими как СКВИДы и квантовые приборы, которые требуют создания непростых дополнительных условий для их функционирования, индукционные магнитометры очень нетребовательны к внешним обстоятельствам. Благодаря этим качествам, они практически не заменимы при проведении современных полевых геофизических и электроразведочных работ.

Указанные свойства дали возможность проводить электромагнитные зондирования Земной коры от первых сотен метров до десятков километров с использованием лишь одного типа датчиков, что существенно сократило как количество приборов, вывозимых для проведения полевых работ с одной стороны, а с другой – увеличило производительность труда, благодаря уменьшению количества требуемых измерений. Одним из основных направлений использования индукционных магнитометров в разведочной геофизике является поиск геотермальных вод методом широкополосного МТЗ. Ряд примеров таких работ, выполненных датчиками IMS-007, можно найти на сайте [Dewhurstgroup, 2015].

На рис. 16 приведена псевдо трехмерная картинка распределения кажущегося сопротивления в районе выхода на поверхность геотермальных вод, построенная по результатам площадных измерений, выполненных совместно компаниями Dewhurst Group (США) и ВЕГА (Россия) с помощью индукционных магнитометров производства Российской компании в штате Невада (США).

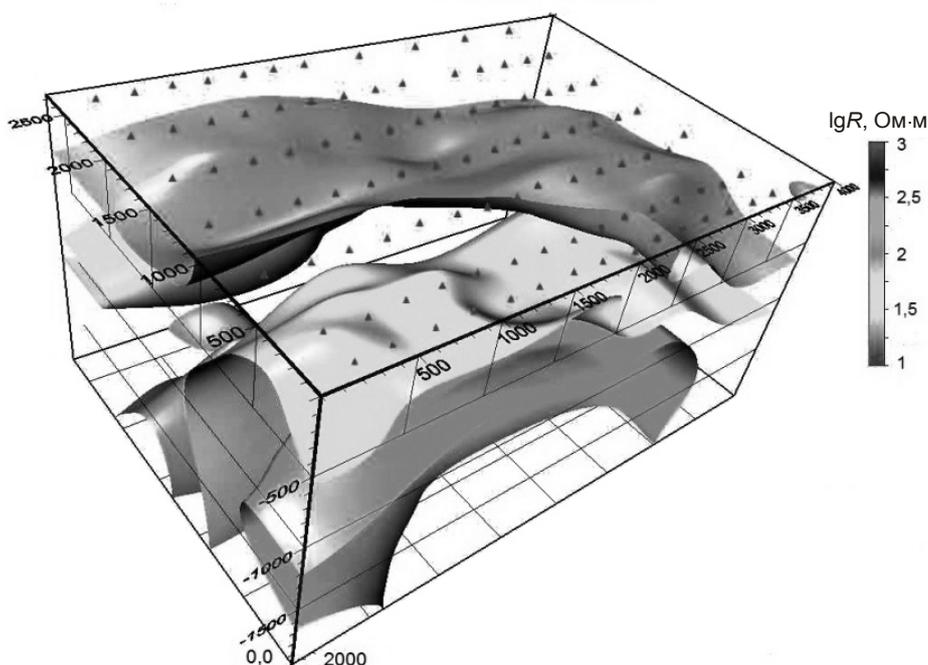


Рис. 16. Трехмерная картина распределения кажущегося сопротивления в районе выхода на поверхность геотермальных вод, полученная с использованием датчиков IMS-007

В работе [Жамалетдинов и др., 2013] приводятся результаты, полученные с использованием магнитных индукционных датчиков IMS-008 при проведении электромагнитных зондирований с контролируемым источником. Целью исследования было изучение глубинного строения литосферы и прослеживание газо-нефтеперспективных горизонтов в осадочном чехле Западно-Сибирской платформы на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО).

Необходимо отметить, что целый ряд академических научно-исследовательских задач по изучению низкочастотного электромагнитного поля Земли невозможен без использования индукционных магнитометров.

На рис. 17 в качестве примера приведена суточная спектрограмма вариаций магнитного поля в диапазоне частот до 16 Гц, зарегистрированная датчиками IMS-008 в августе 2010 г. на полигоне “Новая жизнь” (Нижегородская область). На рисунке отчетливо проявляется частотно-временная структура геомагнитного поля с тремя

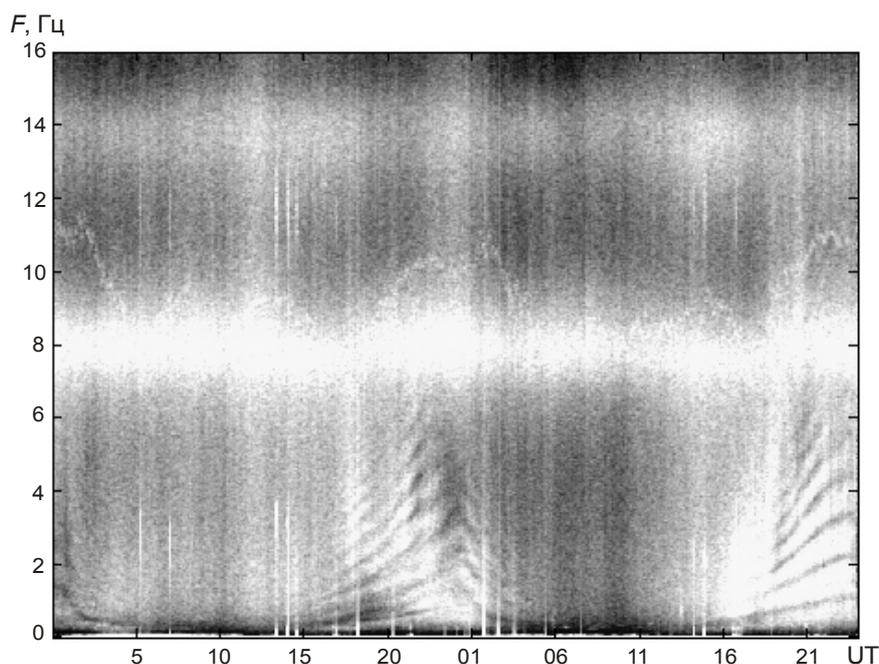


Рис. 17. Суточная спектрограмма, полученная датчиками IMS-008 на полигоне “Новая жизнь” (Нижегородская область) 13–14 августа 2010 г.

шумановскими резонансами, а также хорошо прослеживаются такие тонкие особенности электромагнитного поля, как резонансная структура спектра (РСС), определяемая ионосферным альвеновским резонатором.

По своей природе и природе вещей (частотная характеристика индукционного магнитометра и типичный спектр естественного шумового фона) индукционный датчик имеет наименьшее значение коэффициента сигнал – шум на частотах порядка 1 Гц (см. рис. 9), то есть, как раз на частотах, где наблюдается РСС. Это означает, что регулярная регистрация РСС является качественным тестом индукционного датчика на предельную чувствительность. Сама по себе РСС несет информацию о структуре верхней ионосферы и может быть использована для ее диагностики. По этой причине в настоящее время РСС активно изучается как в России, так и за рубежом.

Таким образом, задачи мониторинга естественного электромагнитного Земли поля для различных целевых объектов наиболее успешно могут быть решены с использованием чувствительных, широкополосных и удобных в обращении индукционных датчиков. Дополнительные конкретные примеры результатов наблюдений, полученных с применением датчиков IMS-007, IMS-008 и IMS-009, можно найти также в работе [Корутенко *et al.*, 2010].

Заключение

В дополнение к представленной линейке индукционных магнитометров планируется изготовить “низкочастотный” датчик для частот $f \leq 30$ Гц с пониженными собственными шумами. Эта разработка ориентирована на проведение градиентных измерений [Поляков *и др.*, 2006] и измерений вертикальной компоненты магнитного поля. По состоянию развития современной техники, по-видимому, можно утверждать, что в лучших образцах описанных выше индукционных магнитометров достигнут фундаментальный технологический предел физических параметров индукционных магнитных преобразователей. Это означает, что с использованием существующих в настоящее время материалов и элементной базы изготовить магнитометр существенно лучшего

качества практически невозможно. Это утверждение касается широкополосных индукционных магнитометров для геофизических и других приложений. В то же время для решения каких-либо других задач, например для измерений в относительно узкой полосе частот, могут быть разработаны и изготовлены магнитометры с существенно меньшими собственными шумами, чем у представленных магнитометров.

Литература

- Александров М.С., Бакленева З.М., Гладштейн Н.Д., Озеров В.П., Потапов А.В., Ремизов Л.Т. Флуктуации электромагнитного поля земли в диапазоне СНЧ. М.: Наука, 1972. 195 с.
- Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С., Шевцов А.Н., Колобов В.В., Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Сергушин П.А., Копытенко Е.А., Бируля М.А., Скороходов А.А., Есипко О.А., Дамаскин Р.В. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников // Физика Земли. 2013. № 6. С.99–115.
- Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
- Колобов В.В., Куклин Д.Н., Шевцов А.Н., Жамалетдинов А.А. Многофункциональная цифровая измерительная станция КВВН-7 для электромагнитного мониторинга сейсмоактивных зон // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47, № 2. С.44–58.
- Нечаев С.А. Руководство по стационарным геомагнитным наблюдениям. Иркутск.: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2006. 140 с.
- Поляков С.В., Резников Б.И., Шлюгаев Ю.В., Копытенко Е.А. Первый опыт пространственной дискриминации крупномасштабных естественных КНЧ помех на примере двухпунктовых измерений магнитного поля от искусственного ионосферного источника // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 12. С.1030–1042.
- Ремизов Л.Т. Естественные радиопомехи. М.: Наука, 1985. 200 с.
- Borzoth R.M. Ferromagnetism. USA, New-York, Princeton: Van Nostrand Reinhold Inc., 1951. 986 p. ISBN 9780442010010.
- Kopytenko E.A., Palshin N.A., Poljakov S.V., Schennikov A.V., Reznikov B.I., Samsonov B.V. New portable, multifunctional broadband MT System // IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop. Abstract. Giza, Egypt, September 18–24, 2010.
- Séran H.C., Fergeau P. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research // Rev. Sci. Instrum. 2005. V. 76, 044502. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1884026> (10 p.).
- Tumanski S. Induction coil sensors-a review // Measurement Science and Technology. 2007. V. 18, N 3. P. R31–R47.
- Dewhurstgroup. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: <http://www.dewhurstgroup.us/ru/index.php/resources>.
- Ferrite. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: <http://www.ferrite.com.ua/amorphous/>.
- Flyer-06e. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: http://www.geo-metronix.de/mtxgeo/images/web/brochures/FlyerMFS-06e_rus_v35.pdf.
- Flyer-07e. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: http://www.geo-metronix.de/mtxgeo/images/web/brochures/FlyerMFS-07e_rus_v35.pdf.
- LEMI-118. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: <http://www.lemisensors.com/?q=LEMI-118>.
- LEMI-120. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: <http://www.isr.lviv.ua/lemi120ru.htm>.
- NVLab. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: <http://www.nvlaboratory.spb.ru/0195.html>.
- Metronix. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: <http://www.geo-metronix.de/mtxgeo/>.
- Phoenix_home. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: <http://www.phoenix-geophysics.com/home/>.
- Phoenix_products. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: <http://www.phoenix-geophysics.com/products/sensors/>.
- Schlumberger. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: http://www.slb.com/~media/Files/rd/technology/product_sheets/emi_bf_4.pdf.

Zonge. [Электронный ресурс], 2015. – Режим доступа: <http://zonge.com/instruments-home/instruments/sensors/>.

Сведения об авторах

ПОЛЯКОВ Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом, Научно-исследовательский радиофизический институт (ФГБНУ НИРФИ). 603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а. Тел.: 8(831)436-35-10. E-mail: SVP@nirfi.sci-nnov.ru

РЕЗНИКОВ Борис Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский радиофизический институт (ФГБНУ НИРФИ). 603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а. Тел./факс: 8(831)432-57-07. E-mail: bobrez@mail.ru

ЩЕННИКОВ Алексей Владимирович – младший научный сотрудник, Научно-исследовательский радиофизический институт (ФГБНУ НИРФИ). 603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а. Тел./факс: 8(831)432-57-07. E-mail: scav110@inbox.ru

КОПЫТЕНКО Евгений Анатольевич – научный сотрудник, Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН). 199034 Россия, г. Санкт-Петербург, Менделеевская линия, д. 1. Тел.: 8(921)955-11-50; ООО “Восточно-Европейская Геофизическая Ассоциация” (ООО “ВЕГА”). 192012, г. Санкт-Петербург, а/я 17, пр. Обуховской обороны, д. 120-Б, БЦ “Троицкое поле 2”, офис 427. E-mail: eugene.kopytenko@vega-geophysics.com

САМСОНОВ Борис Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, генеральный директор, ООО “Восточно-Европейская Геофизическая Ассоциация” (ООО “ВЕГА”). 192012, г. Санкт-Петербург, а/я 17, пр. Обуховской обороны, д. 120-Б, БЦ “Троицкое поле 2”, офис 427. Тел.: 8(812) 380-84-54. E-mail: boris.samsonov@vega-geophysics.com

The range of induction-coil magnetic field sensors for geophysical explorations

S.V. Poliakov¹, B.I. Reznikov¹, A.V. Shchennikov¹,
E.A. Kopytenko^{2,3}, B.V. Samsonov³

¹ Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia

² St.-Petersburg Filial of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg, Russia

³ VEGA Geophysics Ltd., St. Petersburg, Russia

Abstract. The results of many years team-work of specialists' group from Radiophysical Research Institute (NIRFI) and VEGA Geophysics Ltd (VEGA, St. Petersburg) on designing of modern induction-coil magnetic field sensors are given. The comparative analysis of the world's most famous models of sensors is carried out and basic methods and peculiarities of designing and testing are considered. The range of low-noise induction-coil magnetometers designed by the authors for scientific and geophysical ground-based explorations (IMS-007, IMS-008, IMS-009) is described. The results obtained with the sensors for geothermal water exploration by broadband magnetotelluric sounding, lithosphere's deep structure investigation by the method of controlled source electromagnetic sounding, as well as natural electromagnetic Earth's field monitoring are presented.

Keywords: induction-coil magnetometer, magnetotelluric sounding, variable magnetic field of the Earth, ionospheric Alfvén resonator.