

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Научно-исследовательский радиопизический институт»
(ФГБНУ НИРФИ)

Препринт № 551

**ЛИНЕЙКА ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Поляков С.В.
Резников Б.И.
Шлюгаев Ю.В.
Щенников А.В.
Копытенко Е.А.
Самсонов Б.В.**

Нижний Новгород

2013

**Линейка индукционных датчиков магнитного поля
для геофизических исследований // Препринт №551. – Нижний
Новгород: ФГБНУ НИРФИ, 2013. – с.48**

В препринте приведены результаты многолетней совместной работы коллектива специалистов ФГБНУ НИРФИ (С.В. Поляков, Б.И. Резников, Ю.В. Шлюгаев, А.В. Щенников) и ООО «ВЕГА», г. Санкт-Петербург (Е.А. Копытенко и Б.В. Самсонов) 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) и бортовые датчики, предназначенные для космических исследований. Приведены конкретные примеры результатов, полученных с применением датчиков IMS-007, IMS-008 и IMS-009, в задачах поиска геотермальных вод методом широкополосного МТЗ, в изучении глубинного строения литосферы методом электромагнитных зондирований с контролируемым источником, а также в чисто академических задачах мониторинга естественного электромагнитного поля Земли.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....		3
1. Современные индукционные магнитометры		4
1.1. Магнитометры фирмы Metronix		5
1.2. Магнитометры фирмы PNOENIX.....		6
1.3. 1.3 Магнитометры американской фирмы Zonge.....		6
1.4. Магнитометры американской фирмы Schlumberger		6
1.5. Магнитометры Львовского Института космических исследований.....		7
1.6. Российские разработки магнитометров.....		7
2. Основные методы и особенности проектирования и тестирования современных индукционных датчиков.....		10
3. Индукционные датчики для наземных геофизических исследований IMS-008 и IMS-009. Технические параметры и примеры использования		24
3.1. Методики проведения проверок и испытаний датчиков.....		24
3.2. Примеры использования датчиков.....		26
4. Индукционные датчики магнитного поля для космических исследований.....		34
4.1. Бортовой индукционный датчик магнитного поля КНЧ, СНЧ, УНЧ и ОНЧ диапазонов частот.....		34
4.2. Бортовой индукционный датчик магнитного поля НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов частот.....		38
Заключение		43
Литература		43

Введение

Первые опыты по разработке прецизионных низкочастотных индукционных датчиков магнитного поля были выполнены в НИРФИ в первой половине восьмидесятых годов прошлого века и с различным темпом продолжают по настоящее время. Таким образом, история совершенствования магнитных датчиков в НИРФИ насчитывает примерно 30 лет.

В 1980 году 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). Уместно

отметить, что стандартные геомагнитные обсерватории ориентированы на регистрацию спорадических сигналов большой амплитуды и, как правило, не могут обеспечить достаточно качественный мониторинг регулярного электромагнитного шумового фона.

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 – ООО «ВЕГА» (г. Санкт-Петербург). Описанию данной работы и посвящена основная часть данной публикации. Мы не приводим детального описания датчиков, применявшихся на первом этапе исследований ввиду того, что по совокупности параметров они существенно проигрывают современным разработкам.

В работе также содержится описание бортовых индукционных низкочастотных и высокочастотных датчиков магнитного поля для мониторинга электромагнитной обстановки в ближнем космосе. Эта разработка находится пока на стадии создания технологического образца.

1. Современные индукционные магнитометры

Прецизионные измерения слабых магнитных полей составляют быстро развивающийся раздел метрологии, находящий множество применений как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. К первым относятся многочисленные исследования в области фундаментальной физики, геофизики, геологии, космофизики, аэронавтики и т.д. Ко вторым – мониторинг магнитного поля Земли, постоянно осуществляемый несколькими международными сетями обсерваторий.

Среди многочисленных типов датчиков магнитного поля индукционные датчики выделяются по простоте конструкции, технологии изготовления, доступности материалов и эксплуатационной надежности. Они представляют из себя индукционную катушку с сердечником из ферромагнитного материала или воздушную много- или одновитковую рамку без сердечника.

27. Поляков С., Шлюгаев Ю., Щенников А. Магнитный датчик для ВЧ диапазона – «РЗ» // Материалы конференции-совещания по проекту. Проект «Резонанс». Многоспутниковые исследования внутренней магнитосферы. Киев, 19 - 21 сентября 2012г., стр. 64 - 67.
28. Cavoit C. Closed loop applied to magnetic measurements in the range of 0,1-50 MHz. // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. Art. no. 064703.
29. 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.

14. Bozorth R.M. Ferromagnetism. Van Nostrand, Princeton, 1951.
15. Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
16. <http://www.ferrite.com.ua/amorphous/>
17. Séran H.C., Fergeau P. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research. // Rev. Sci. Instrum. 2005. V. 76. Art. no. 044502; <http://dx.doi.org/10.1063/1.1884026>
18. Tumanski S. Induction coil sensors—a review // Measurement Sci. Technology. 2007. V.18, No.3 .
19. Александров М.С., Бакленева З.М., Гладштейн Н.Д. и др. Флуктуации электромагнитного поля земли в диапазоне СНЧ. М.: Наука, 1972. 195 с.
20. Ремизов Л.Т. Естественные радиопомехи. М.: Наука, 1985. 200 с.
21. Нечаев С.А., Руководство по стационарным геомагнитным наблюдениям. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2006. 140 с.
22. <http://www.dewhurstgroup.us/ru/index.php/resources>.
23. Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С., Шевцов А.Н. и др. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников // Физика Земли. 2013 (в печати).
24. Kopytenko E.A., Palshin N.A., Poljakov S.V., et al. 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.
25. Щенников А.В., Корзников В.В., Резников Б.И. Система калибровки индукционных датчиков с возможностью подавления промышленных помех // Международная конф. «Физика внутренней магнитосферы и авроральной области: актуальные задачи и методы их решения (проект РЕЗОНАНС)». Москва, ИКИ РАН, 1-5 июня 2010 года.
26. Щенников А.В., Резников Б.И., Поляков С.В., Шлюгаев Ю.В. Бортовой индукционный датчик магнитного поля КНЧ, СНЧ и ОНЧ диапазонов частот // Международная конф. «Физика внутренней магнитосферы и авроральной области: актуальные задачи и методы их решения (проект РЕЗОНАНС)». Москва, ИКИ РАН, 1-5 июня 2010 года.

В последнее время достигнут значительный прогресс в области повышения метрологических характеристик индукционных магнитометров и расширения частотного диапазона их работы. Основным фактором, ограничивавшим возможности индукционных датчиков на частотах ниже единиц Герц, являлся фликкер-шум линейных усилителей. Для преодоления этой проблемы разработчики стали применять параметрические нелинейные усилители типа модулятор-демодулятор (МДМ). Это позволило в конечном итоге решить проблему собственных шумов усилителя на низких частотах.

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

1.1. Магнитометры фирмы Metronix [1]

Немецкая фирма Metronix (Метроникс) предлагает линейку из двух широкополосных датчиков: «низкочастотного» датчика MFS-06 [2] и «высокочастотного» MFS-07 [3]. 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, сверхнизкими шумами, а также возможностью проведения внутренней калибровки и стабильностью передаточной функции. Плоский участок АЧХ при великолепных шумовых характеристиках находится в диапазоне от 4 Гц до, примерно, 8 кГц. Длина датчика 125 см при диаметре 75 мм и весе 8,5 кг.

«Высокочастотный» индукционный магнитометр MFS-07 [3] в основном предназначен для измерений в диапазоне звуковых частот при аудиоманнитотеллурических зондированиях и зондированиях 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 стандартных магнитотеллурических измерениях.

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. Дифференциальный тестирующий сигнал может быть подан на калибровочный вход датчика. Плоский участок АЧХ начинается с 32 Гц. Датчик имеет габариты 80 см в длину при диаметре 75 мм и весит 5,5 кг.

1.2. Магнитометры фирмы PHOENIX (Феникс) [4,5]

Семейство индукционных магнитометров компании Феникс представлено двумя типами широкополосных датчиков: низкочастотным МТС-50 и высокочастотным АМТС-30. Датчики предназначены для работы в составе магнитотеллурических установок производства компании Феникс. Приведенные на сайте компании 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 амплитудных и фазовых характеристик, у датчика отсутствует обратная связь по полю, что приводит к существенным неоднородностям АЧХ и ФЧХ, затрудняет обработку данных и ухудшает стабильность его характеристик. Высокочастотный датчик АМТС-30 имеет в длину 820 мм при диаметре 60 мм. Частотный диапазон датчика от 1 Гц до 10 кГц.

1.3 Магнитометры американской фирмы Zonge [6]

Продукция представлена тремя типами датчиков. Датчик ANT/4 – самый низкочастотный в серии. Он имеет длину 138 см при диаметре 4,8 см 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 91 см и диаметре 4,8 см весит 3,2 кг, плоский участок АЧХ имеет диапазон от 10 Гц до 10 кГц. Датчик ANT/5 – самый маленький и легкий в серии (61 см при диаметре 3,6 см и весе 1,5 кг) предназначен для измерений в диапазоне 0,25 Гц – 10 кГц.

1.4. Магнитометры американской фирмы Schlumberger [7]

Продукция представлена линейкой из четырех датчиков BF-4, BF-6, BF-7 и BF-10, предназначенных для работы в различных диапазонах частот. BF-4 – самый низкочастотный из них, имеет плоский участок АЧХ в диапазоне от 1 Гц до 700 Гц (рабочий диапазон 0,0001 Гц – 700 Гц), при длине 142 см и диаметре 6 см весит 7,9 кг.

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 [29] и измерений вертикальной компоненты магнитного поля. По состоянию развития современной техники можно утверждать, что в лучших образцах описанных выше индукционных магнитометров достигнут фундаментально-технологический предел физических параметров индукционных магнитных преобразователей.

Это означает, что с использованием существующих в настоящее время материалов и элементной базы, изготовить магнитометр лучшего качества невозможно. Это утверждение касается широкополосных индукционных магнитометров для геофизических приложений. Для решения каких-либо других задач, например, для измерений в относительно узкой полосе частот, могут быть разработаны магнитометры с существенно меньшими собственными шумами, по сравнению с представленными магнитометрами.

Литература

1. <http://www.metronix.de/metronix/index.php>
2. http://178.63.62.205/mtxgeo/images/brochures/FlyerMFS-06e_rus_v33.pdf
3. http://178.63.62.205/mtxgeo/images/brochures/FlyerMFS-07e_en_v33.pdf
4. <http://www.phoenix-geophysics.com/home>
5. <http://www.phoenix-geophysics.com/products/sensors>
6. <http://www.zonge.com>
7. http://www.slb.com/about/rd/technology/emi/bf_sensor.aspx
8. <http://www.isr.lviv.ua/lemi120ru.htm>
9. <http://www.lemisensors.com/?q=LEMI-118>
10. <http://www.isr.lviv.ua/lemi106ru.htm>
11. <http://www.nvlaboratory.spb.ru/0195.html>
12. <http://sniim.nsk.ru/old/departs/07>
13. 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.

вторичной обмотки согласующего устройства. Емкость C_2 , как и C_1 очень сложно оценить корректно. Приняты специальные меры для уменьшения величины емкостей.

Учитывая второе правило Кирхгофа для первого и второго контуров эквивалентной схемы, несложно показать, что максимальное отношение сигнала к шуму (оптимальное согласование) достигается при условии $L_1 = L_0$. При этом обеспечивается уверенный прием минимального естественного шумового фона на борту КА – космического шума.

Конструктивные требования.

- Габаритные размеры: Высота не более 600 мм;
 Максимальный диаметр не более 550 мм;
- Масса: не более 1000 г.
- Технические характеристики блока магнитных датчиков:
- частотный диапазон – 10 кГц – 10 МГц;
 - уровень шума на частоте 1 МГц не выше $1 \text{ фТл}/(\text{Гц})^{1/2}$ – уровень космического шумового фона.

Фотография технологического образца датчика приведена на рис. 4.7.



Рисунок 4.7 – Технологический образец датчика РЗ.

Среднечастотный образец BF-10 имеет частотный диапазон от 0,1 Гц до 10 кГц при тех же габаритах и весе.

1.5. Магнитометры Львовского Института космических исследований

Датчики семейства LEMI разработаны львовским институтом космических исследований и представлены на рынке довольно широким спектром специализированных преобразователей. Магнитометр LEMI-120 [8] характеризуется исключительно низким уровнем шумов и широким динамическим частотным диапазоном, что делает его пригодным для различных применений в геофизике. Встроенный в датчик предварительный МДМ-усилитель с малым потреблением энергии и дифференциальным выходом позволяет использовать датчик, отнесенный от регистратора на расстояние до 200 метров от места установки магнитометра. Датчик LEMI-120 имеет длину 134 см при диаметре 8,5 см и массе 6 кг. Он характеризуется достаточно высокой чувствительностью и работает в частотном диапазоне 0,0001 – 1000 Гц.

Индукционный магнитометр LEMI-118 [9] представляет собой среднечастотный датчик для полосы частот 1 – 70000 Гц. Его длина 80 см и вес 1,7 кг. Магнитометр для космических исследований LEMI-106 [10] имеет частотный диапазон 0,5 – 50000 Гц. Методика расчета по критерию минимальной массы позволила значительно уменьшить массу этого индукционного преобразователя до 320 г при длине 40 см. Глубокая обратная связь по магнитному потоку позволила реализовать плоскую АЧХ с низким уровнем шумов в широком диапазоне частот.

1.6. Российские разработки магнитометров

На Российском рынке до последнего времени практически отсутствовало предложение отечественных индукционных магнитометров высокого класса. Можно упомянуть лишь несколько образцов.

Датчик НВ0195_7 [11] разработки ООО НПО ЭНТ (С.–Петербург) 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 аудиоманнитотеллурического зондирования. Датчик размещен в прочном водонепроницаемом стеклотекстолитовом корпусе трубчатой формы длиной 1110 мм, диаметром 70 мм и имеет вес 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.

Датчики разработки СНИИМ (Новосибирск) [12] с отрицательной обратной связью по магнитному полю, аналоговым и цифровым выходом предназначены для использования со стандартной аппаратурой МТЗ и АМТЗ. Магнитометры также могут использоваться для мониторинга за состоянием магнитного поля Земли, биофизических и экологических исследований. Набор различных датчиков обеспечивает измерение характеристик магнитной индукции в частотном диапазоне 10^{-3} Гц – 20 кГц.

На базе разработанных в СНИИМ магнитометров была создана автоматическая станция магнитной подсистемы мониторинга за соблюдением договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. В основе программно-математического обеспечения лежит алгоритм, осуществляющий автоматическое обнаружение геомагнитных возмущений в диапазоне короткопериодных колебаний (0,01 – 20 Гц), возникающих при ядерных испытаниях в околоземном пространстве.

В работе [13] описана высокочувствительная измерительная станция КВВН-7, использующая магнитные датчики отечественной разработки и позволяющая одинаково эффективно выполнять частотные зондирования с контролируемыми источниками и аудиоманнитотеллурические зондирования 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 ФГБНУ НИРФИ (Нижний Новгород) и ООО «ВЕГА» (Санкт Петербург) были разработаны современные индукционные датчики для геофизических применений в широком диапазоне частот IMS-007, IMS-008 и IMS-009, а также бортовые низкочастотный и высокочастотный датчики магнитного поля для мониторинга электромагнитной обстановки в ближнем космосе. Подробные описания конструкции и технических характеристик этих датчиков приведены ниже в разделах 4 и 5.

В таблице 1 сведены основные метрологические характеристики упомянутых датчиков (частотный диапазон и шумы), прочерки

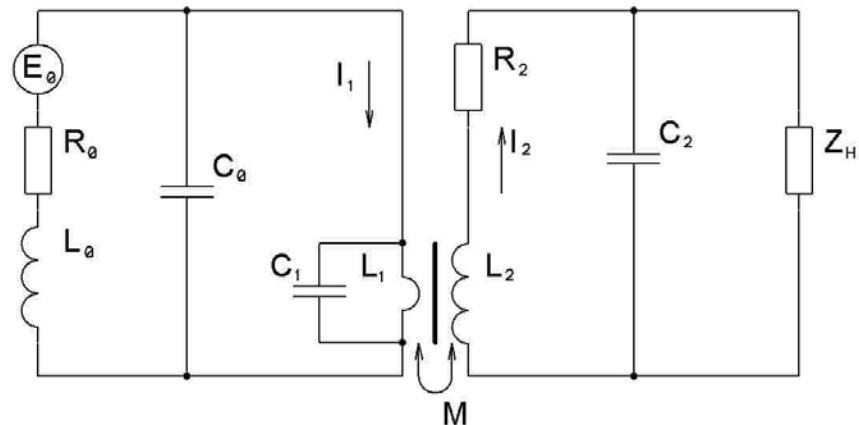


Рисунок 4.6 – Эквивалентная электрическая схема индукционного датчика с согласующим устройством.

Здесь L_0 , C_0 и R_0 соответственно индуктивность, емкость и сопротивление круглой рамки со средним радиусом $D_0/2$ из провода (трубки) радиуса r . L_1 – дополнительная индуктивность, вносимая за счет магнитного потока, сцепленного с ферромагнитным кольцом. C_1 – паразитная емкость, определяемая электрическим взаимодействием рамки с ферромагнитным кольцом. E_0 – электродвижущая сила, наводимая в рамке переменным внешним магнитным полем.

Датчик спроектирован как широкополосный прибор, работающий в диапазонах длинных, средних и коротких радиоволн. Собственный резонанс рамки без учета влияния ферромагнитного кольца лежит в диапазоне ультракоротких волн. При учете индуктивности L_1 собственный резонанс рамки понизится. Для многovitковой рамки, начиная с 2÷3 витков, существенно возрастает индуктивность L_0 (пропорционально квадрату количества витков) и появляется межвитковая емкость (C_0 возрастает). В этом случае собственный резонанс попадает в коротковолновый диапазон, т.е. в рабочий диапазон частот, что неудобно и нежелательно. Таким образом, одновитковая рамка фактически является вынужденным решением.

Связь со вторым контуром осуществляется через ЭДС взаимной индукции с коэффициентом M . Здесь R_2 (Ом) – сопротивление вторичной обмотки согласующего устройства, Z_H (Ом) – входной импеданс предварительного усилителя, C_2 (Ф) – паразитная емкость

индукционного датчика и несущего каркаса и является одновитковой. Это обеспечивает оптимальное соотношение между рабочими частотами и собственным резонансом рамки.

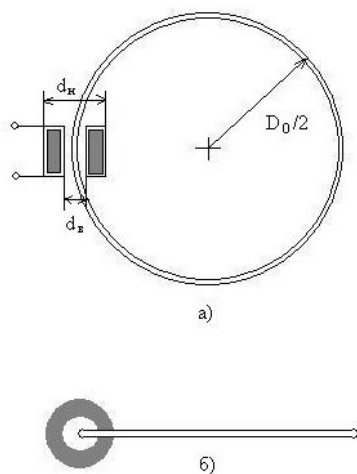


Рисунок 4.5 – Основные элементы конструкции индукционного датчика
а) – вид в плане, б) – вид сбоку.

Согласующее устройство (СУ) между рамкой и предварительным усилителем (ПУ) выполнено в виде бесконтактного трансформаторного датчика тока (пояс Роговского) [26]. СУ содержит в себе кольцо из ферромагнитного материала с обмоткой.

СУ не является идеальным трансформатором, так как часть магнитного потока рамки замыкается в окружающем пространстве, минуя ферромагнитное кольцо.

В конструкции предусмотрена обратная связь для корректировки (выравнивания) АЧХ системы. Впервые использование замкнутой рамки с поясом Роговского в качестве индукционного датчика магнитного поля было предложено в работе [28].

Эквивалентная электрическая схема предлагаемого индукционного датчика приведена на рисунке 4.6.

означают, что датчик находится вне диапазона, либо то, что разработчик не приводит сведений по шумам.

На самых низких частотах лучшими характеристиками обладает датчик МТС-50 фирмы «Феникс», однако уже на частотах порядка $10^{-2} - 10^{-1}$ Гц датчик теряет свои преимущества перед остальными.

Таблица 1. Основные технические характеристики датчиков

	Частотный диапазон	Шумы датчика на частоте 0,01 Гц $nТл/Гц^{1/2}$	Шумы датчика на частоте 1 Гц $nТл/Гц^{1/2}$	Шумы датчика на частоте 1000 Гц $nТл/Гц^{1/2}$
MFS-06	0.00025Гц - 10 кГц	10^{-2}	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-7}$
MFS-07	0,001Гц 50 кГц	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
МТС -50	0,0002Гц – 400 Гц	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-4}$	–
АМТС -30	1 Гц 10 кГц	–	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$
ANT/4	0,0001Гц-1кГц	10^{-2}	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-5}$
ANT/6	0,1 Гц – 10 кГц	–	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-6}
BF-4	0,001Гц 700 Гц	10^{-2}	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-5}$
BF-10	0,1 Гц – 10 кГц	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$
LEMI-102	0,001Гц 200 Гц	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-5}$	–
LEMI-120	0,0001Гц 10 кГц	10^{-2}	10^{-4}	–
НВ0195_7	0,1 Гц 20 кГц	–	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
СНИИМ	0,001Гц 20 кГц	–	–	–
IMS - 007	0,001Гц 10 кГц	–	–	–
IMS - 008	0.0001 Hz – 1000Гц	10^{-2}	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-7}$
IMS - 009	0,001Гц 10 кГц	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$

По нашему мнению, наиболее универсальным и сбалансированным по предельной чувствительности и частотному диапазону является датчик MFS-06 разработки фирмы «Метроникс». Однако для выполнения конкретных научных или прикладных задач потребитель может выбрать и другой датчик из представленного списка,

руководствуясь его ценой, габаритами, удобством эксплуатации или совместимостью с имеющимися средствами регистрации, накопления и обработки данных.

Хотелось бы также отметить, что до настоящего времени не существует общепринятых методик проверки такой основополагающей характеристики датчика, как предельная чувствительность – минимального уровня полезного сигнала, который может зарегистрировать данный датчик. Этот параметр определяется уровнем собственных шумов датчика, его экспериментальная проверка сталкивается с рядом технических проблем. Методики таких проверок, как правило, в описаниях не приводятся, так что указываемые в рекламных материалах параметры чаще всего остаются на совести разработчиков и порой вызывают сомнения при использовании датчиков в практике измерений.

2. Основные методы и особенности проектирования и тестирования современных индукционных датчиков

На рис. 2.1 представлен типичный внешний вид и отдельные элементы конструкции индукционного датчика магнитного поля. Конструктивно индукционный датчик представляет собой либо катушку индуктивности с сердечником из ферромагнитного материала, либо одновитковую или многовитковую рамку.

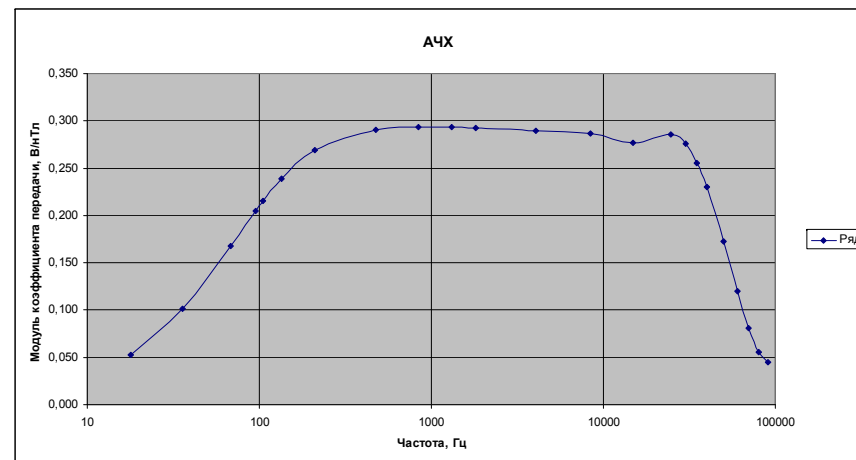
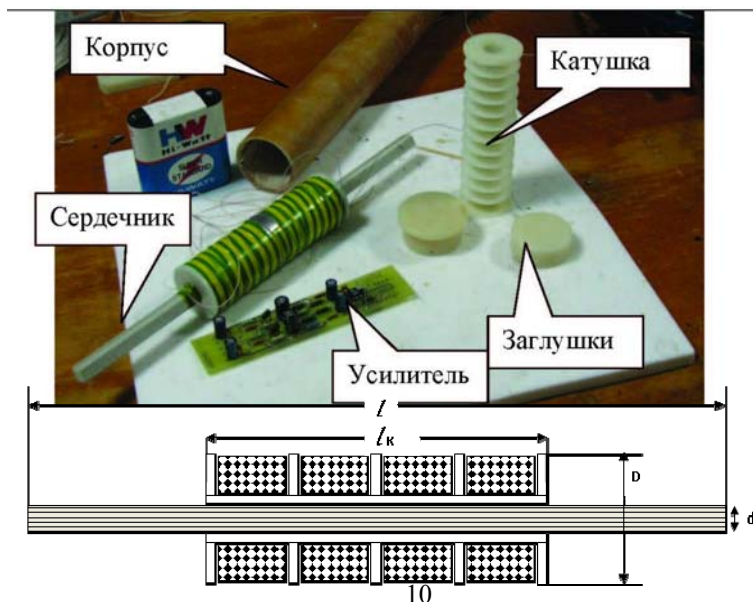


Рисунок 4.3 – АЧХ датчика МД.

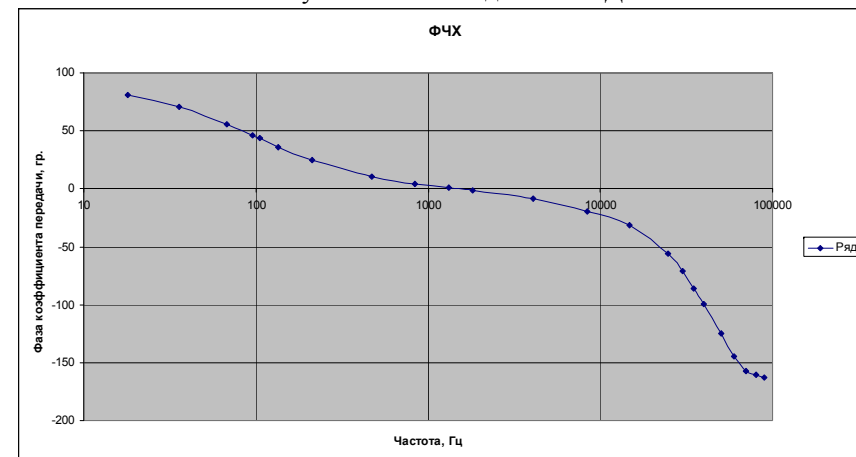


Рисунок 4.4 – ФЧХ датчика МД.

Магнитный датчик РЗ предназначен для изучения взаимодействия волн и частиц во внутренней магнитосфере Земли и, в частности, исследования свойств Аврорального Километрового Радиоизлучения (АКР) в рамках международного космического проекта «Резонанс».

Принцип работы прибора.

Основные элементы конструкции приведены на рис. 4.5. Конструкция содержит рамку в виде кольца из дюралюминиевой трубки. Она одновременно играет роль приемного витка

сожалению, высокий уровень промышленных электромагнитных помех не позволяет проводить измерения характеристик высокочувствительных индукционных датчиков в условиях городской лаборатории.

Помехи приводят к перегрузке датчика. Поэтому калибровка проводится на загородных полигонах вдали от крупных населенных пунктов, где уровень помех значительно ниже. Проведение таких работ требует значительных временных затрат на подготовку и транспортировку оборудования.

Создание датчика – процесс многоступенчатый и требует проведения нескольких калибровок, что значительно увеличивает время и стоимость разработки. Эта проблема была решена дополнением калибровочной установки еще одной системой, которая осуществляет подавление сетевых гармоник в месте расположения калибровочного стенда [25].

Наиболее существенный вклад в спектр промышленных помех вносят первая и третья гармоники сети (50 и 150 Гц). В районе этих частот и происходит подавление поля. Система представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из высокопроизводительной рабочей станции на базе РС, двух звуковых карт профессионального уровня с поддержкой протокола ASIO, блоков коммутации и усиления, колец Гельмгольца, соединительных кабелей и программного обеспечения.

С помощью данной установки удалось подавить гармоники сети на 20 и более децибел. Аппаратно-программный комплекс вносит определенные искажения в частотные характеристики поля вблизи частот подавления. При проведении испытаний эти искажения необходимо учитывать. На рисунках 4.3 и 4.4 приведены АЧХ и ФЧХ датчиков, измеренные в кольцах Гельмгольца.

Принцип разработки подробно изложен в докладе на Международной конференции «Физика внутренней магнитосферы и авроральной области: актуальные задачи и методы их решения (проект РЕЗОНАНС)», проходившей в ИКИ РАН с 1 по 5 июня 2010 г. [26].

4.2 Бортовой индукционный датчик магнитного поля НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов частот

По договору с ИКИ РАН в НИРФИ разработан трехкомпонентный индукционный датчик магнитного поля для НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов частот (датчик РЗ).

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. По закону Фарадея напряжение на выходе индукционного преобразователя для внешнего магнитного поля H , меняющегося по гармоническому закону с циклической частотой ω , задается следующим соотношением:

$$U_d = i\omega\mu_{\text{эфф}}\mu_0 N H_0 S; \quad S = \frac{1}{4}\pi d^2. \quad (2.1)$$

В уравнении (2.1) и на рис. 2.1 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 – площадь сечения сердечника, H_0 – амплитуда напряженности магнитного поля, d – диаметр сердечника, D – внешний диаметр катушки.

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 [14]:

$$\mu_{\text{эфф}}^* = \frac{\mu}{1 + K(\mu - 1)}, \quad (2.2)$$

где K – геометрический фактор, определяемый выражением

$$K = \left(\frac{d}{l}\right)^2 \left[\ln\left(2\frac{l}{d}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

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 (2.2–2.3) недостаточно, необходимо выбирать некоторое осредненное значение $\mu_{эфф}$ по длине сердечника, занимаемого катушкой (только тогда мы имеем право умножать на количество витков в формуле (2.1)).

Экспериментальная проверка подтвердила правильность и хорошую точность следующей инженерной формулы для средней действующей эффективной проводимости $\mu_{эфф}$, полученной в работе [15]:

$$\mu_{эфф} = \frac{\mu_{эфф}^* \left[1 - 0.255 \left(\frac{l_k}{l} \right)^2 \right]}{1 + 0.975 \left(\frac{S}{l^2} \right) \left[\ln \left(\sqrt{\pi l^2 / S} \right) - 1 \right] (\mu_{эфф}^* - 1)} \quad (2.4)$$

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. 2.2 представлены результаты расчета зависимости величины $\mu_{эфф}$ 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.

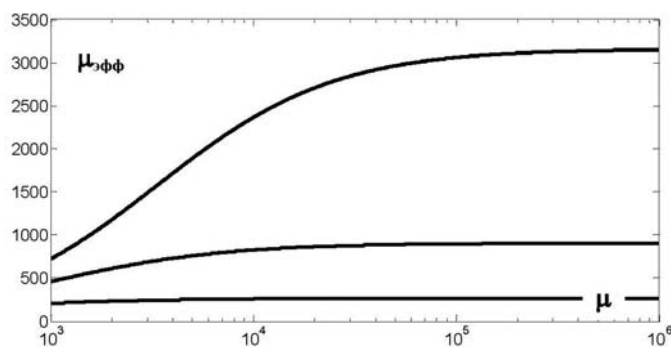


Рисунок 2.2 – Зависимость эффективной магнитной проницаемости сердечника $\mu_{эфф}$ от относительной магнитной проницаемости материала μ для $l=120$ см, 60 см и 30 см (диаметр сердечника 10 мм).

коррекции (на схеме не показаны) позволило расширить рабочий диапазон датчика до 40 кГц без ухудшения шумовых свойств на низких частотах.

Расчетные величины спектральной плотности собственных шумов датчика приведены на рис. 4.3. Расчет учитывает тепловой шум приемной катушки, шумовое напряжение усилителя, шумовой ток усилителя, протекающий через комплексный импеданс приемной катушки. Тепловые потери в сердечнике ввиду их пренебрежимой малости по сравнению с другими источниками шумов не учитывались. Потери в сердечнике начинают проявляться на частотах выше 80 кГц, что намного выше верхней частоты рабочего диапазона.

Калибровка датчика проводится с использованием специально разработанного аппаратно-программного комплекса, который позволяет подавлять основные гармоники электросети.

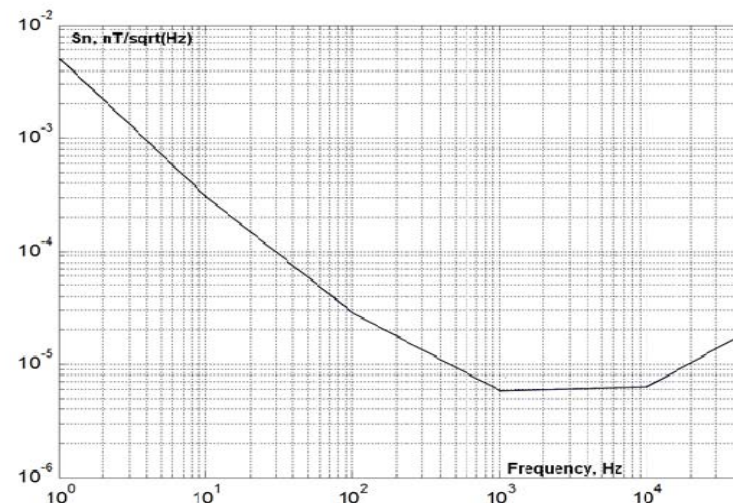


Рисунок 4.2 – Собственные шумы датчика МД.

Разработка данного комплекса была начата с целью дополнения уже существующей системы калибровки индукционных магнитометров.

Система работает следующим образом: через кольца Гельмгольца, имеющие известный передаточный коэффициент, пропускается ток определенной величины. В области, где поле колец Гельмгольца является однородным, располагается тестируемый датчик. По соотношению амплитуды тока в кольцах и выходного напряжения датчика можно судить о его передаточной характеристике. К

- форма передаточной характеристики датчика – линейно-плоская с частотой перегиба 100 Гц;
- неравномерность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик датчика не хуже 1 дБ и 3 угловых градусов;
- уровень сигнала на плоской части передаточной характеристики не более 10 нТл.

Конструктивные требования.

Длина не более 300 мм

Масса не более 300 г.

Следует отметить, что характеристики разработанного датчика полностью соответствуют заданным в ТЗ, а по некоторым пунктам, в частности, по потребляемой мощности, массе, габаритам и шумовым параметрам, даже лучше.

Упрощенная блок-схема датчика приведена на рис. 4.2.

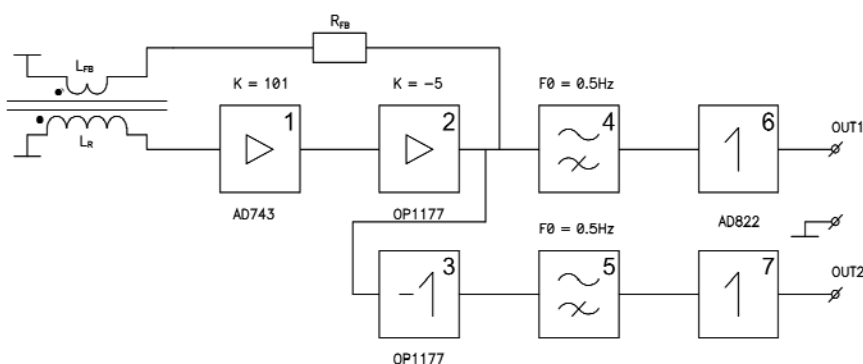


Рисунок 4.2 – Блок-схема датчика МД.

Здесь L_r – приемная катушка; L_{fb} – катушка обратной связи; R_{fb} – резистор обратной связи; 1 – малошумящий входной усилитель (неинвертирующий); 2 – регулируемый усилитель (инвертирующий); 3 – инвертор; 4, 5 – ФВЧ; 6, 7 – выходные буферы.

Датчик питается от источника $\pm 5 \text{ В}$ при максимальном потребляемом токе 20 мА на плечо. Выход усилителя датчика – дифференциальный и способен работать на большую емкостную нагрузку. Амплитуда выходного напряжения на каждом из выходов $\pm 4 \text{ В}$. В датчике также предусмотрены цепи контроля работоспособности путем подачи тестового сигнала извне. Данные связи на схеме не показаны. Использование специальных цепей

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 относительной магнитной проницаемости “длинного” сердечника с $L = 120 \text{ см}$ (низкие частоты) необходимо использовать материал с проницаемостью в десятки тысяч. Это необходимо в большей степени не для достижения максимальных значений эффективной проницаемости сердечника, а для получения высокой стабильности этой величины при изменении температуры, влажности и других факторов.

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 ~ 10000).

Материалы с указанными выше свойствами в настоящее время вполне доступны. При этом наибольшее распространение получили слоистые сердечники, спрессованные из тонкой ленты магнито-мягких аморфных сплавов (петля гистерезиса материалов должна быть как можно более узкой). На рис.2.3 для примера представлена частотная зависимость начальной магнитной проницаемости для сердечников из аморфных магнито-мягких сплавов **ММ-1Н** и **ММ-11Н (MELTA Ltd)** [16]. Аналогичные изделия в настоящее время выпускаются и в России. До частот в десятки килогерц они обеспечивают величины проницаемости материала в десятки–сотни тысяч. Слоистость сердечника при этом обеспечивает минимальные тепловые потери.

В формулу (2.1) входит величина $S_{эфф} = \mu_{эфф} S$, задающая степень концентрации сердечника по магнитному полю, назовем ее эффективной площадью сердечника. Эта величина в основном определяется геометрическими размерами сердечника и катушки.

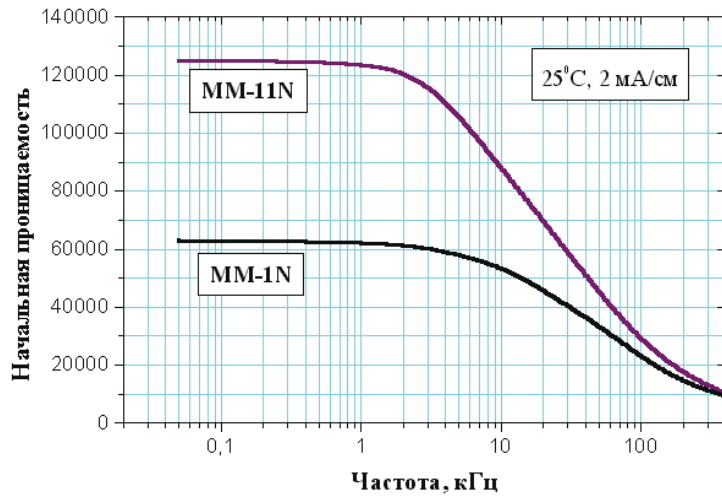


Рисунок 2.3 – Частотная зависимость начальной магнитной проницаемости $\mu(f)$ для сердечников из MM-1N и MM-11N сплавов.

На рисунках 2.4, 2.5 и 2.6 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.

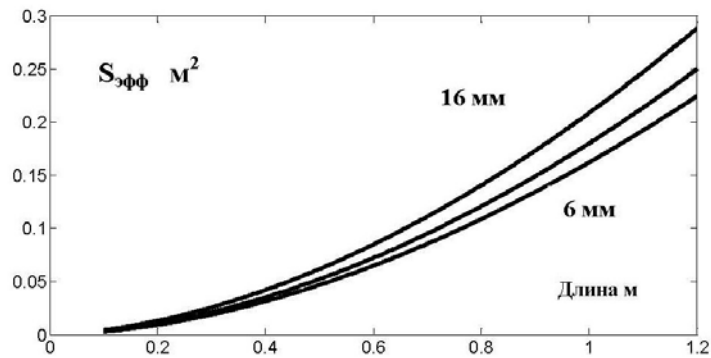


Рисунок. 2.4 – Зависимость величины $S_{эфф}$ сердечника от его длины в метрах для диаметра сердечника 6 мм, 10 мм и 16 мм.



Рисунок 5.1 – Датчик МД. Технологический образец.

Магнитный датчик предназначен для установки на каждый из четырех однотипных космических аппаратов (КА) «Ионосфера», а также на КА «ЗОНД», объединенных в орбитальную группировку, для проведения мониторинга геофизической обстановки («космической погоды») путем измерения основных параметров процессов в атмосфере, ионосфере и магнитосфере.

Запуск КА «Ионосфера» запланирован на 2015 г. на солнечно-синхронные круговые орбиты в две орбитальные плоскости (по два КА в каждой плоскости) с высотой 820 км. КА «Зонд» будет выведен в 2015 г. на околокруговую солнечно-синхронную околотерминаторную орбиту высотой порядка 650 км. Ближайшими аналогами датчика являются IMSC (КА «DEMETER», Франция), LEMI-106I (Львовский центр Института космических исследований), SCM (КА «THEMIS», США).

Датчик выполнен в соответствии с техническим заданием, часть которого приведена ниже:

- диапазон частот 1 Гц – 20 кГц;
- уровень шума 1 Гц – 10 пТл / (Гц)^{1/2}
 100 Гц – 100 фТл / (Гц)^{1/2}
 1 кГц – 10 фТл / (Гц)^{1/2}
 10 кГц – 10 фТл / (Гц)^{1/2} ;

поля, как резонансная структура спектра (РСС), определяемая ионосферным альвеновским резонатором.

Из-за специфической частотной зависимости чувствительности датчика, с одной стороны, и естественного шумового фона, с другой, индукционный датчик имеет наименьшее значение коэффициента сигнал–шум на частотах порядка 1 Гц (см. Рис. 3.10), 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 поля Земли для различных целевых объектов наиболее успешно могут быть решены с использованием чувствительных, широкополосных и удобных в обращении индукционных датчиков. Дополнительные конкретные примеры результатов, полученных с применением датчиков IMS-007, IMS-008 и IMS-009, можно найти также в работе [24].

4. Индукционные датчики магнитного поля для космических исследований

4.1 Бортовой индукционный датчик магнитного поля КНЧ, СНЧ, УНЧ и ОНЧ диапазонов частот

По договору с Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) сотрудниками ФГБНУ НИРФИ был разработан малогабаритный индукционный датчик магнитного поля (МД) для диапазонов крайне низких, сверхнизких, ультранизких и очень низких частот (КНЧ, СНЧ, УНЧ, ОНЧ).

Внешний вид датчика представлен на рис. 4.1.

Конструктивно датчик представляет собой многосекционную катушку на сердечнике в одном корпусе с предварительным усилителем. Особенностью сердечника являются малые потери на высоких частотах за счет многослойной конструкции. Секционирование приемной катушки способствует уменьшению ее собственной емкости и росту частот паразитных резонансов. Для выравнивания амплитудно-частотной характеристики использована обратная связь по магнитному полю.

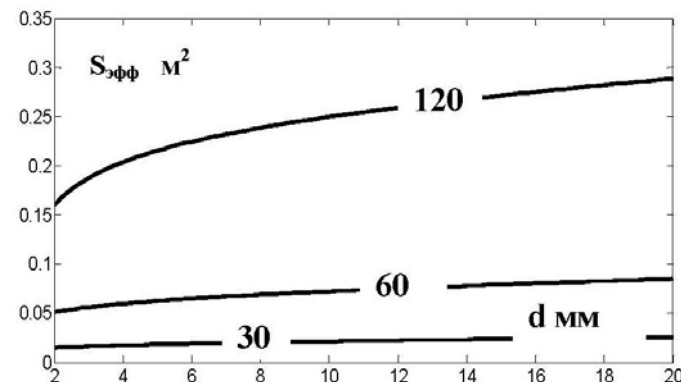


Рисунок 2.5 – Зависимость величины $S_{эфф}$ сердечника от его диаметра в мм для длины сердечника 120 см, 60 см и 30 см.

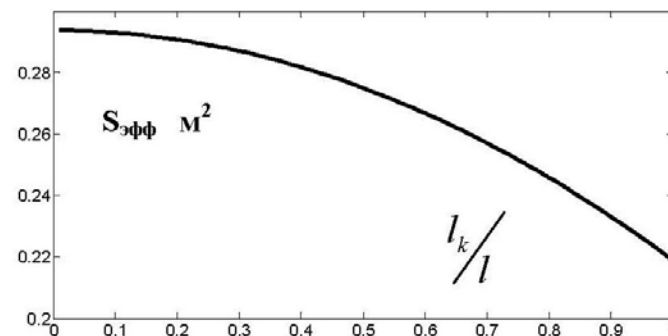


Рисунок 2.6 – Зависимость величины $S_{эфф}$ сердечника от коэффициента заполнения χ для сердечника длиной 120 см и диаметром 16 мм.

Естественным ограничителем здесь являются габариты и вес 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 весе до 10 кг. В тоже время стационарно устанавливаемым на научных полигонах и обсерваториях датчикам длину разумно увеличить.

Как показано на рис. 2.5, 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, во-первых, эта зависимость весьма слабая, и, во-вторых, увеличение диаметра приводит к росту диаметра

витков приемной катушки, увеличению ее сопротивления и, соответственно, шумов.

Рисунок 2.6 достаточно очевидно иллюстрирует 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 (2.1) количество витков N также является одним из наиболее значимых параметров датчика, определяющих его частотные свойства (ширину полосы), собственные шумы и предельную чувствительность. На кривых, представленных на рис. 2.4, 2.5 и 2.6, присутствуют области сильных и слабых зависимостей, что позволяет при разработке, варьируя эти параметры, получить оптимальные весогабаритные и метрологические характеристики датчиков.

Амплитудно-частотная характеристика «идеального» датчика, согласно уравнению (2.1), 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 $C = C_{\text{д}} + C_{\text{вх}}$.

На рис. 2.7 представлена импедансная схема подключения датчика к усилителю. Здесь L – индуктивность приемной катушки, R – ее активное сопротивление, $C_{\text{д}}$ – распределенная межвитковая емкость катушки в сумме с другими паразитными емкостями датчика (емкость катушка–сердечник, катушка–экран и т.д.), $C_{\text{вх}}$ и $R_{\text{вх}}$ – входные емкость и сопротивление усилителя.

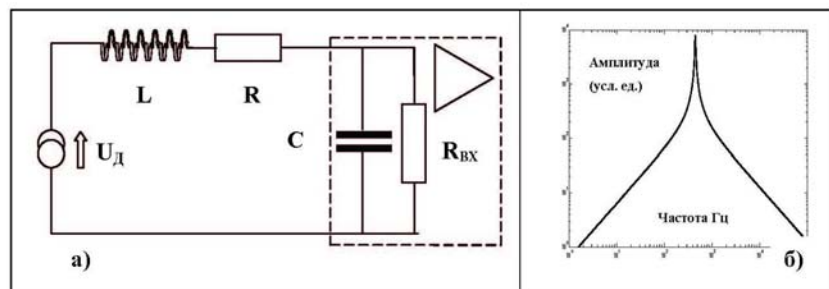


Рисунок 2.7 – а) Импедансная схема подключения датчика к усилителю, б) АЧХ датчика в условных единицах.

В работе [23] 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.

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

На рис. 3.8, в качестве примера, приведена суточная спектрограмма вариаций магнитного поля в диапазоне частот до 18 Гц, зарегистрированная датчиками IMS-008 осенью 2012 года на полигоне «Новая жизнь» (Нижегородская область).

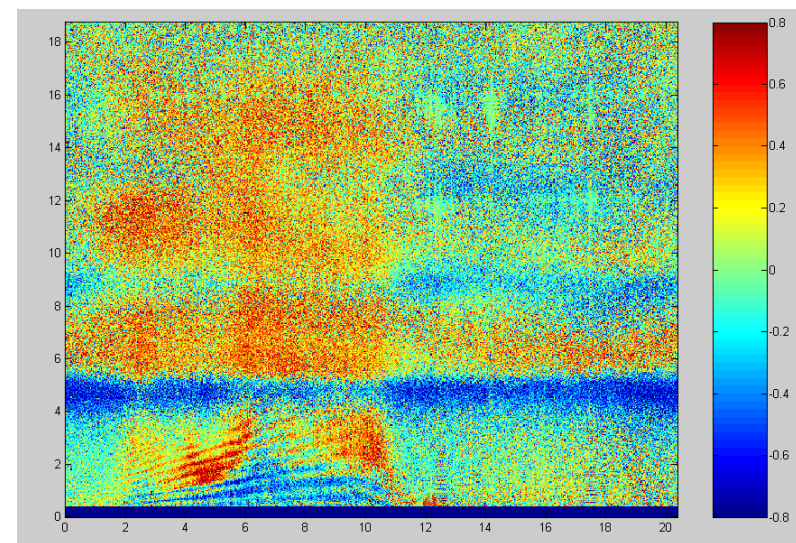


Рисунок 3.8 – Суточная спектрограмма, полученная датчиками IMS-008.

На рисунке отчетливо проявляется частотно-временная структура геомагнитного поля с тремя «шумановскими» резонансами, а также хорошо прослеживаются такие тонкие особенности электромагнитного

Указанные свойства дали возможность проводить электромагнитные зондирования Земной коры от первых сотен метров до десятков километров, используя лишь один тип датчиков, что существенно сократило количество приборов, вывозимых для проведения полевых работ, с одной стороны, и с другой стороны, 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 [22].

На рис. 3.7 приведена псевдотрехмерная 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).

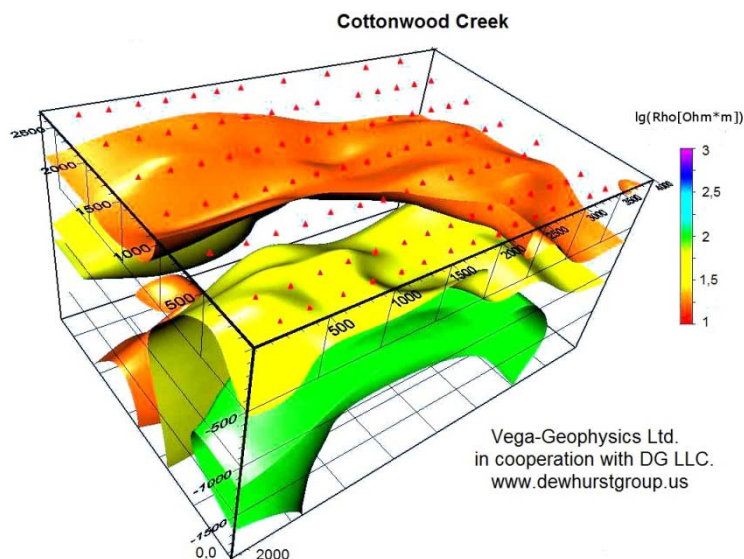


Рисунок 3.7 – Трехмерная картинка распределения кажущегося сопротивления в районе выхода на поверхность геотермальных вод, полученная с использованием датчиков IMS-007.

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

$$\begin{aligned} Z_L &= i\omega L; \quad Z_R = R; \quad Z_C = 1/i\omega C, \\ Z_{BX} &= Z_C R_{BX} / (Z_C + R_{BX}) - \text{входной импеданс усилителя,} \end{aligned} \quad (2.5)$$

а сигнал непосредственно на входе усилителя U_{BX} будет равен:

$$U_{BX} = \frac{Z_{BX}}{(Z_L + Z_R + Z_{BX})} U_D = P(\omega) U_D \quad (2.6)$$

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

Амплитудно-частотная характеристика описанных датчиков представляет собой резонансную кривую (рис. 2.7 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:

$$U_{BX} = P(\omega) \omega \mu_0 \mu_{\text{эфф}} S N H_0. \quad (2.7)$$

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 от 0,5 до 1,5), так что требования к динамическому диапазону приемной аппаратуры на низких частотах в этом случае резко снижаются [19, 20].

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 рисунке 2.8 а приведена структурная схема такого подключения, а на рис. 2.8 б и 2.8 в – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) датчика для различных коэффициентов усиления и различных значений сопротивления в петле обратной связи. На рисунке 2.8 г представлен пример фазочастотной характеристики датчика с обратной связью.

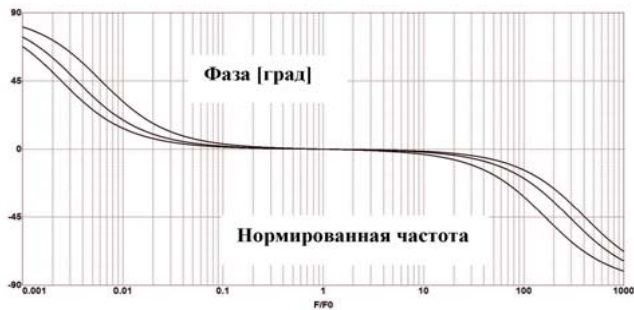
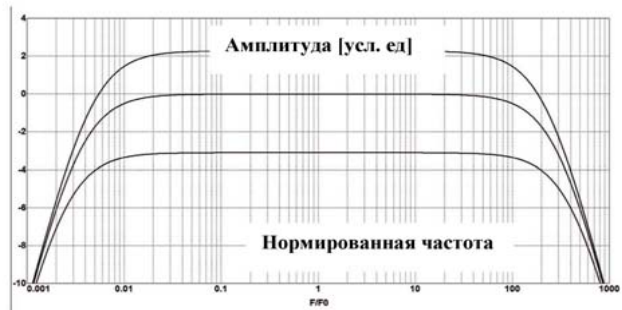
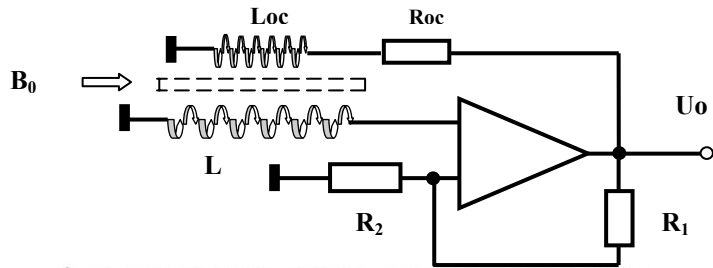


Рисунок 2.8 – (а) Структурная схема подключения обратной связи, амплитудно-частотная характеристика датчика при различных k_{oc} (б) и различных значениях резистора R_{oc} (в); пример фазочастотной характеристики датчика с обратной связью (г).

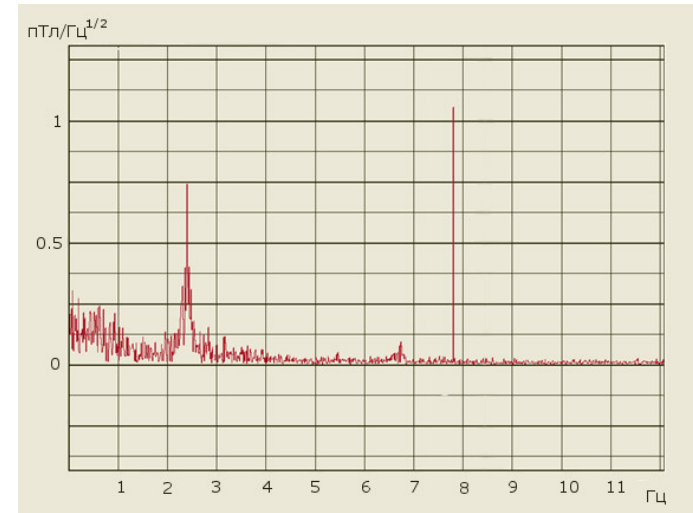


Рисунок 3.6 – Шумовой спектр магнитометра IMS-008.

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 (примерно 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 по температуре и времени.

3.2 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 незаменимы при проведении современных полевых геофизических и электроразведочных работ.

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.

На рисунке 3.5 помимо характеристик датчиков IMS-008 и IMS-009 для сравнения приведены частотные характеристики известных в России датчиков МТС-50 фирмы Phoenix и феррозондового магнитометра.

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 произведя 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 $12 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$.

На рис. 3.6 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.

Как видно из рисунков 2.8, на АЧХ датчиков образуется обширный участок с плоской характеристикой, удобный при обработке результатов измерений, однако фазочастотная характеристика датчика при этом становится нелинейной (2.8 г).

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.

Комплексная передаточная функция датчика с усилителем и обратной связью по полю обсуждается в ряде работ. Так, в работе [17] получено следующее выражение для чувствительности датчика (отношения амплитуды сигнала на выходе усилителя U_o к амплитуде вариации индукции магнитного поля B_o):

$$\frac{U_o}{B_o} = \frac{-i\omega\mu_{эфф} N S k_{oc}}{1+i\omega \left(R C + \frac{k_{oc} M}{R_{oc}} \right) - L C \omega^2} \quad (2.8)$$

В формуле (2.8) 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. 2.8 нормирована на частоту резонанса:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}, \\ \omega_0 &= 2\pi f_0, \end{aligned} \quad (2.9)$$

а на плоской амплитудно-частотной характеристике возникают низкочастотный и высокочастотный спады с частотами среза по уровню $0,7f_1$ (в области низких частот) и f_2 (в области высоких частот), связанные с параметрами цепи следующим образом [17]:

$$f_1 = \frac{R_{oc}}{2\pi k_{oc} M}, \quad f_2 = \frac{k_{oc} M}{2\pi R_{oc} LC} \quad (2.10)$$

Для расчетов электротехнических параметров цепи обычно используется ряд полуэмпирических формул с различными поправочными коэффициентами. В обзорной статье [18], например, для

расчета индуктивности катушки датчика и взаимной индуктивности приводятся следующие соотношения:

$$L = \mu_0 \mu_{эфф} \frac{N^2 S}{l} \lambda, \quad \lambda = 1,85 - 1,1 \chi, \quad (2.11)$$

$$M = \mu_0 \mu_{эфф} \frac{N N_{oc} S}{l} \lambda,$$

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 цепи защиты датчика от высокочастотных радиопомех, что дает в сумме около 100 пФ. Межвитковые емкости катушки, а также емкости катушка–сердечник и катушка–экран составляют единицы пикофард, и, в первом приближении, при расчете датчика ими следует пренебречь.

Тогда чувствительность датчика на плоском участке АЧХ можно оценить по следующей простой формуле [17]:

$$\frac{U_o}{B_o} = R_{oc} \frac{l}{\mu_o N_{oc} \lambda}. \quad (2.12)$$

Окончательное значение чувствительности датчика на плоском участке, требуемое для оптимального согласования электронной схемы датчика с устройством регистрации (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 промышленных 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

Массивная алюминиевая плита, на которой смонтированы кольца Гельмгольца, изолирована от фундамента с помощью сложной системы гашения механических вибраций.

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 представлены на рис. 3.5.

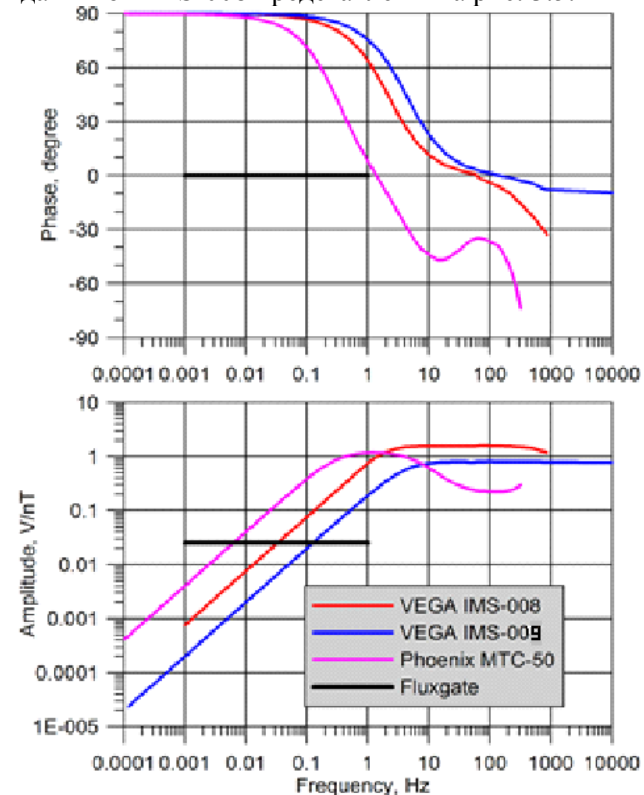


Рисунок 3.5 – АЧХ и ФЧХ магнитометров IMS-008 и IMS-009.

Помимо стандартных лабораторных и полигонных испытаний с измерением амплитудной и фазовой частотных характеристик датчиков, несколько образцов магнитометров IMS-008 прошли метрологические тестирования на базе Отраслевого научно-методического метрологического центра ФГУНПП «Геологоразведка». Целью экспериментальных работ было уточнение АЧХ и ФЧХ 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 [21]. Калибровочная система установлена на изолированном от пола павильона цементном основании (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Поверочный стенд в ФГУНПП «Геологоразведка»

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 шумы 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 (2.7) для амплитуды полезного сигнала.

Тепловой шум. Любой резистор на плате усилителя, $p-n$ 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 задается формулой:

$$u_T = (4kTR)^{1/2}, \quad (2.13)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град). 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. На высоких частотах вследствие скин-эффекта эффективная проницаемость сердечника становится комплексной, а тепловые потери определяются так называемым тангенсом угла потерь в сердечнике:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{пот}} = \left(\frac{\operatorname{Im}(\mu_{\text{эфф}})}{\operatorname{Re}(\mu_{\text{эфф}})} \right) \quad (2.14)$$

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 (2.13) 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 частот в сотни килогерц тепловыми шумами сердечника можно пренебречь.

Шумы предварительного усилителя. На рисунке 2.9 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:

$$u_{ш} = [e_{ш}^2 + (Zi_{ш})^2]^{1/2} \quad (2.15)$$

здесь Z – модуль полного импеданса датчика)

Слагаемые в скобках (2.15) – 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 и могут быть выбраны оптимальным образом путем подбора схмотехники, элементной базы и рабочих токов.

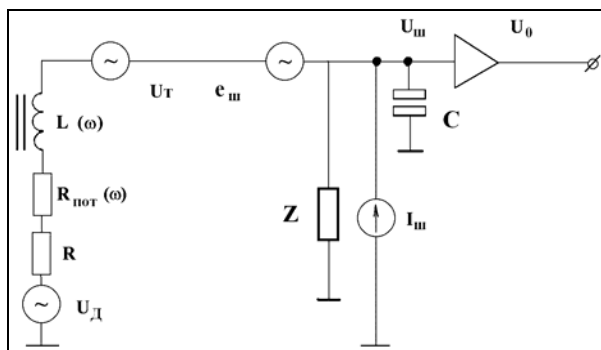


Рисунок 2.9 – Эквивалентная шумовая схема датчика с предварительным усилителем.

Калибровка с использованием сигнала «белый шум» является удобным и быстрым методом качественного сравнения характеристик датчиков во всей полосе частот. На рис. 3.2 приведены результаты тестирования трех экземпляров датчиков **IMS-008** с применением «белого шума».

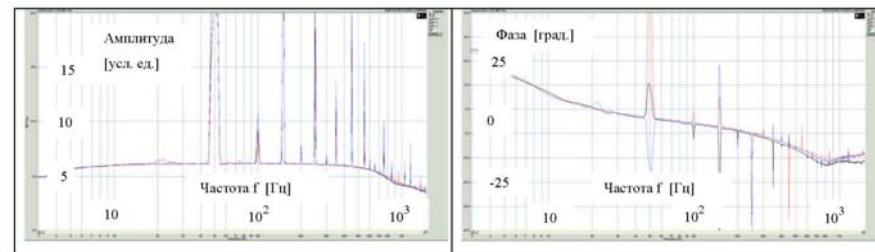


Рисунок 3.2 – АЧХ (а) и ФЧХ (б) трех датчиков IMS-008, измеренные по методу «белого шума»

Испытания на полигоне заканчиваются проведением параллельного теста, когда серия одинаковых датчиков крепится на стенде или на 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 по методу МТЗ.

На рисунке 3.3 а показан пример проведения параллельного теста 12 датчиков **IMS-007** перед выполнением поисковых электроразведочных работ в пустыне, а на рис. 3.3 б представлен результат сравнения АЧХ шести датчиков **IMS-007** после параллельного теста.

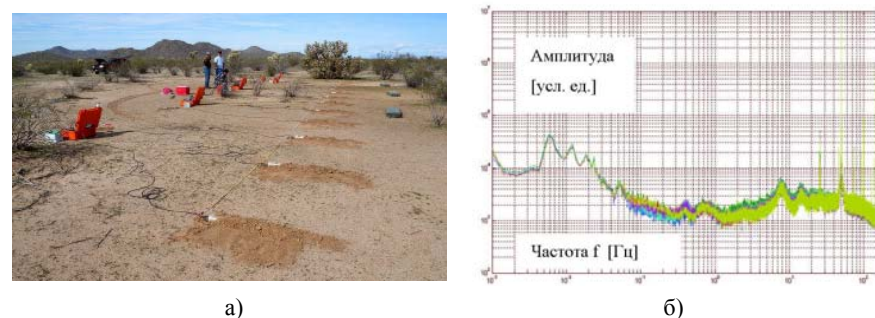


Рисунок 3.3 – а) Пример проведения параллельного теста датчиков IMS-007 по естественному фону (штат Аризона, США); б) спектральная плотность естественного электромагнитного поля сигналов.

Завершают линейку датчиков малогабаритные высокочастотные магнитометры, разработанные для космических исследований. Конструкция этих датчиков более подробно будет описана в следующих разделах.

Низкие собственные шумы магнитометров позволяют при использовании градиентного метода измерений [28] 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 конструктивных особенностей, а со стороны низких частот – использованием малошумящих МДМ-усилителей (усилители класса модулятор-демодулятор или «чоппер»). Встроенная функция калибровки облегчает пользователям выполнение проверки передаточной функции магнитометра непосредственно в условиях эксперимента.

Датчики размещены в прочных водонепроницаемых стеклотекстолитовых трубах диаметром 75 мм. Для повышения защиты от механических воздействий корпус покрыт термоусаживаемой пленкой. С обеих сторон корпус герметично закрыт заглушками, на одной из которых установлен разъем для подключения соединительного кабеля. Малошумящий предварительный усилитель и кабельный усилитель с дифференциальным выходом размещены в общем корпусе с преобразователем и подключаются кабелем через разъем к системе регистрации и питания (рис. 3.1 б).

3.1. 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 приемлемым уровнем промышленных помех. В качестве источника известного поля используются кольца Гельмгольца, либо излучатель типа магнитного диполя, располагаемый в 20–50 м от закрепленных на стендах датчиков.

Точные измерения чувствительности АЧХ и ФЧХ датчиков производятся по стандартному набору частот. Для выявления возможных особенностей характеристик отдельных экземпляров во всем частотном диапазоне датчики облучаются сигналом «белый шум».

Поскольку, индукционный датчик относится к источнику с большим внутренним сопротивлением, то в качестве первых элементов предварительного усилителя используют специальные 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 $R_{\text{вх}} = e_{\text{ш}} / i_{\text{ш}}$.

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 [19, 20]. На рисунке 2.10 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 не равномерно. Так, в самом нижнем участке частотного диапазона преобладают шумы напряжения усилителя и тепловые шумы активного сопротивления датчика.

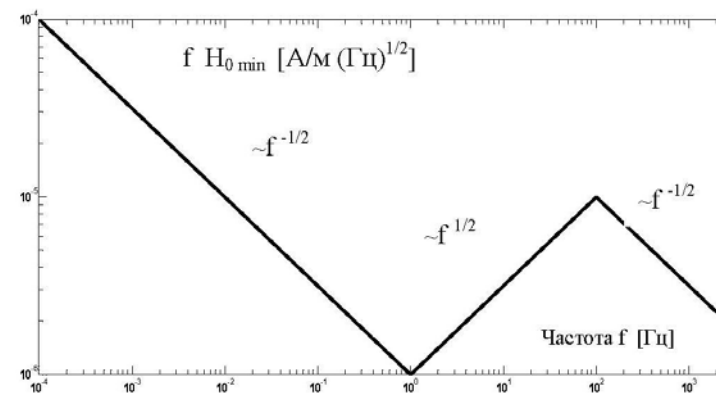


Рисунок 2.10 – Модель спектра минимального уровня геомагнитного шумового фона, приведенного к входу предварительного усилителя. АЧХ датчика учтено фактором f .

До недавнего времени основным фактором, ограничивавшим возможности датчиков на низких частотах, считался фликкер-шум линейных усилителей. Для преодоления этих проблем были разработаны параметрические нелинейные усилители с модуляцией и демодуляцией сигнала, так называемые «чопперы», широко

используемые современными разработчиками. Непрерывное совершенствование схемотехники таких усилителей с применением новой элементной базы позволило снизить шумы напряжения до величин порядка нескольких единиц $\text{нВ}/(\text{Гц})^{1/2}$. К сожалению, «чоперы» имеют большие токовые шумы (шумы переключения), что приводит к высоким уровням шума датчика на высоких частотах. В современных датчиках схемы с «чоперами» делают отключаемыми.

На высоких частотах (выше сотен герц) современные линейные усилители имеют характерные шумы напряжения $1,5\text{--}2 \text{ нВ}/(\text{Гц})^{1/2}$ при токовом шуме в единицы $\text{фА}/(\text{Гц})^{1/2}$. Для сравнения, токовые шумы «чопера» составляют сотни $\text{фА}/(\text{Гц})^{1/2}$. Так как все упомянутые виды шумов не коррелированы, то полное шумовое напряжение $U_{\text{ш}}$ определяется следующим образом:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 Z^2 + 4kT(R + R_{\text{ном}})}. \quad (2.16)$$

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:

$$B_{\text{мин}}(f) = \frac{(e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 Z^2 + 4kT(R + R_{\text{ном}}))^{1/2}}{2\pi f \mu_{\text{эфф}} N S} \quad (2.17)$$

3. 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.

В основе разработки лежит многолетний опыт специалистов, помноженный на использование современных материалов и элементной базы. 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 рисунке 3.1 показан внешний вид комплекта датчиков IMS-007. Основные характеристики магнитометров IMS-007, IMS-008 и IMS-009 приведены в таблице 2.



а) Внешний вид комплекта датчиков IMS-007.
б) Предварительный усилитель. Таблица 2

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 «чопера»
Частотная характеристика	(4 Гц – 10 кГц) плоская (0,001 Гц – 4 Гц) линейная	(2 Гц – 1 кГц) плоская (0,0001 Гц – 2 Гц) линейная	(4 Гц – 10 кГц) плоская (0,001 Гц – 4 Гц) линейная	
Измеренный уровень шума	-	$10^{-2} \text{ нТ}/\text{Гц}^{1/2}$ на 0,01 Гц $10^{-4} \text{ нТ}/\text{Гц}^{1/2}$ на 1 Гц $5 \cdot 10^{-7} \text{ нТ}/\text{Гц}^{1/2}$ на 1 кГц	$2 \cdot 10^{-2} \text{ нТ}/\text{Гц}^{1/2}$ на 0,01 Гц $2 \cdot 10^{-4} \text{ нТ}/\text{Гц}^{1/2}$ на 1 Гц $10^{-6} \text{ нТ}/\text{Гц}^{1/2}$ на 1 кГц	
Чувствительность	-	0,8 (В/нТ)·Гц (0,0001 Гц – 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	$\pm 10 \text{ В}$	$\pm 10 \text{ В}$	$\pm 10 \text{ В}$	$\pm 2,5 \text{ В}$ (опция)
Потребляемый ток	60 мА (при 12 В)	65 мА (при 12 В)	40 мА (при 12 В)	
Размеры	Длина: 800 мм Диаметр: 75 мм	Длина: 1240 мм Диаметр: 75 мм	Длина: 800 мм Диаметр: 65 мм	
Вес	6 кг	8 кг	6 кг	
Рабочая температура	от -40 до +60 °С	от -40 до +60 °С	от -40 до +60 °С	