

**Б.И. Резников**  
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
**А.В. Щенников**  
ФГБНУ «НИРФИ»

## ПРОБЛЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ключевые слова: датчик магнитного поля, тестирование, шумы.

Постановка задачи приема слабых искусственных сигналов потребовала разработки индукционных датчиков с собственными шумами ниже минимального уровня регулярного шумового фона. В докладе обсуждаются основные проблемы, возникающие в процессе разработки таких приборов, а также при лабораторных и полевых испытаниях и проверках реальных характеристик индукционных датчиков.

Прецизионные измерения слабых магнитных полей составляют быстро развивающийся раздел метрологии, находящий множество применений, как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. Среди многочисленных типов датчиков магнитного поля индукционные датчики выделяются по простоте конструкции, технологии изготовления, доступности материалов и эксплуатационной надежности. Индукционный метод измерения переменного магнитного поля базируется на законе электромагнитной индукции Фарадея.

Конструктивно индукционный датчик представляет собой катушку индуктивности с сердечником из ферромагнитного материала, подключенную к малому усилителю. Ферромагнитный сердечник искажает измеряемое магнитное поле, концентрируя в себе магнитные силовые линии и, в конечном итоге, увеличивает магнитный поток, сцепленный с витками измерительной катушки. Амплитудно-частотная характеристика «идеального» датчика 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, и реальная амплитудно-частотная характеристика индукционных датчиков представляет собой резонансную кривую с линейным ростом амплитуды с частотой на низких частотах и спадом на частотах выше резонансной, вызванным паразитной емкостью обмотки и входной емкостью усилителя.

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

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 час-

тот. Для выявления возможных особенностей характеристик отдельных экземпляров во всем частотном диапазоне датчики облучаются сигналом «белый шум». Калибровка с использованием сигнала «белый шум» является удобным и быстрым методом качественного сравнения характеристик датчиков во всей полосе частот. 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.

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.

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. 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 характеризуются шумом напряжения на входе усилителя и напряжением шума, порождаемого прохождением входного шумового тока усилителя через импеданс источника. При малом сопротивлении источника сигнала преобладает шум напряжения, а при большом – шум тока. 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, «чопперы» имеют большие токовые шумы (шумы переключения), что приводит к высоким уровням шума датчика на высоких частотах. 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 единицы  $\text{фА}/(\text{Гц})^{1/2}$ . Для сравнения, токовые шумы «чоппера» составляют сотни  $\text{фА}/(\text{Гц})^{1/2}$ .

В последние годы в результате совместных работ ФГБНУ НИРФИ и ООО «ВЕГА» (Санкт-Петербург) была разработана линейка современных малощумящих 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 [3]. 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 проводи-

лись в несколько этапов с использованием экранированной двухкомпонентной меры магнитной индукции ЭДММИ. 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  $12 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ .

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. 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, полученных с применением датчиков IMS-007, IMS-008 и IMS-009 можно найти так же в работе [2].

#### Список литературы:

- [1] H. C. Séran and P. Ferreau., An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research., Rev. Sci. Instrum. 76, 044502 (2005); <http://dx.doi.org/10.1063/1.1884026> (10 pages)
- [2] Копытенко Evgeny Anatolevich, Palshin Nikolay Alekseevich, Poljakov Sergej Vladimirovich, Schennikov Alexej Vladimirovich, Reznikov Boris Ivanovich, Samsonov Boris Vladimirovich. 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.
- [3] 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, стр. 1030–1042.

**О.И. Шарова**  
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
**М.И. Агафонов**  
ФГБНУ «НИРФИ»

## **ДВУМЕРНАЯ И ТРЕХМЕРНАЯ АСТРОТОМОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОГО ПОДХОДА. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ**

Ключевые слова: тесные двойные звездные системы, 2D и 3D-томография, доплеровская томография, радиоастрономический подход.

Проведено исследование зависимости качества восстановления доплеровских томограмм от числа профилей, полученных при различных орбитальных фазах и от уровня сигнал/шум. Перечислены результаты применения радиоастрономического подхода к реконструкции астротомограмм для алголей и полярков.

Большая часть звезд образует двойные системы, для которых наиболее информативным методом исследования является доплеровская томография [1]. Исходными