

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей физики

**Применение немагнитных экранов для защиты от внешних  
магнитных помех датчиков слабых магнитных полей**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ**

Студентки 2 курса 252 группы

Направления 03.04.02 «Физика»  
код и наименование направления (специальности)  
физического факультета  
наименование факультета, института, колледжа

Зайцевой Елены Сергеевны  
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

Доцент, к.т.н., доцент  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
дата, подпись

Л.А. Романченко  
инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

Профессор, д.ф.-м.н., профессор  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
дата, подпись

А.А. Игнатьев  
инициалы, фамилия

Саратов 2017 год

## Введение

Измерение магнитной индукции магнитных полей осуществляется с помощью магнитометров или датчиков магнитного поля. Датчик магнитного поля представляет собой устройство, преобразующее индукцию магнитного поля в некоторую физическую величину. При этом возможно измерение такими устройствами как постоянных, так и переменных магнитных полей. Требования к чувствительности датчиков по магнитному полю непрерывно повышаются, что связано с развитием технических возможностей и усложнением современной измерительной аппаратуры. В настоящее время требуется возможность измерения индукции постоянных магнитных полей в диапазоне от  $10^{-16}$  (магнитный вакуум) до 30 Тл, для переменных магнитных полей – от  $10^{-15}$  до нескольких Тл. Существуют различные типы датчиков, применяемые в качестве основной измерительной части магнитометра. Наиболее распространенными являются индукционные, гальваномагнитные, магниторезонансные, феррозондовые, магниторезистивные, магнитомеханические, SQUID (от англ. Superconducting Quantum Interference Devices – квантовые интерференционные устройства на основе сверхпроводимости).

В работе исследовался датчик слабых магнитных полей, принадлежащий к семейству магниторезонансных датчиков на основе ферромагнитного резонанса. Такие датчики имеют небольшие размеры, что является одним из достоинств этих устройств и позволяет использовать их не только на подвижных объектах, но даже внутри сложных технических объектов. Кроме того в комплексе – небольшая масса, миниатюрность, низкое энергопотребление, высокая чувствительность (до  $10^{-11}$ Тл), хорошая разрешающая способность – свидетельство того, что применение датчиков на основе ферромагнитного резонанса является перспективным, а исследование таких датчиков – актуальным.

Наряду с перечисленными достоинствами датчик слабых магнитных полей на основе ФМР имеет недостаток, являющийся следствием его высокой чувствительности. Этот недостаток заключается в том, что при измерении слабых магнитных полей датчик реагирует не только на изменения магнитного поля, которые подлежат измерению, но и на неизбежно существующие в окружающем пространстве магнитные помехи от различных источников. Защита от магнитных (электромагнитных) помех, как правило, осуществляется с помощью экранирования, которое может быть реализовано разными конструкционными и физическими способами. Одним из известных и эффективных способов является использование экранов из ферромагнитных материалов. В результате применения этого способа экранирования удастся значительно ослабить влияние внешних магнитных помех. Однако, применительно к датчикам слабых магнитных полей, предназначенных для измерений незначительных медленных изменений индукции магнитного поля, такой вид экранирования не подходит. Это связано с тем, что с помощью ферромагнитных экранов из показаний датчика устраняется вся информация о колебаниях индукции магнитного поля, в том числе и полезная. Для решения этой проблемы возможно применение экранов из немагнитных материалов (алюминия, меди и др.). Основной целью работы является исследование применения немагнитных кольцевых экранов к датчику слабых магнитных полей на основе ФМР для снижения влияния внешних магнитных помех. Также в работе рассмотрены способы удаления тренда из показаний датчика, которые также позволяют выделить полезную информационную составляющую и иметь более достоверное представление об изменениях магнитного поля.

## Глава 1 Датчик магнитного поля: принцип действия, характеристики

Магнитоэлектронный генератор (МЭГ) представляет собой магниточувствительный автогенератор, в котором используется плёночный

или сферический ЖИГ резонатор, в качестве активного элемента может быть использован биполярный или полевой СВЧ транзистор.

Принцип действия МЭГ основан на явлении ферромагнитного резонанса (ФМР), наблюдающемся в ферритовых структурах под действием внешнего магнитного поля. Для задания рабочей резонансной частоты резонатор необходимо подмагничивать внешним полем тем или иным способом (касательное, нормальное или косоугольное намагничение относительно поверхности пленки ЖИГ резонатора).

Измеряемое магнитное поле  $\bar{B}_i$  и магнитное поле МЭГ  $\bar{B}_0 = \bar{B}_M + \bar{B}_A$  (суперпозиция поля магнитной системы  $\bar{B}_M$  и поля кристаллографической анизотропии ЖИГ резонатора  $\bar{B}_A$ ) образуют результирующую величину  $\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}_i$  (рисунок 1). На рисунке 1.1  $\varphi$  – угол между векторами  $\bar{B}_i$  и  $\bar{B}_0$  (угол магнитного склонения измеряемого поля),  $\alpha$  – угол между векторами  $\bar{B}$  и  $\bar{B}_0$  (угол на который отклоняется  $\bar{B}_0$  при приложении измеряемого поля  $\bar{H}_i$ ).

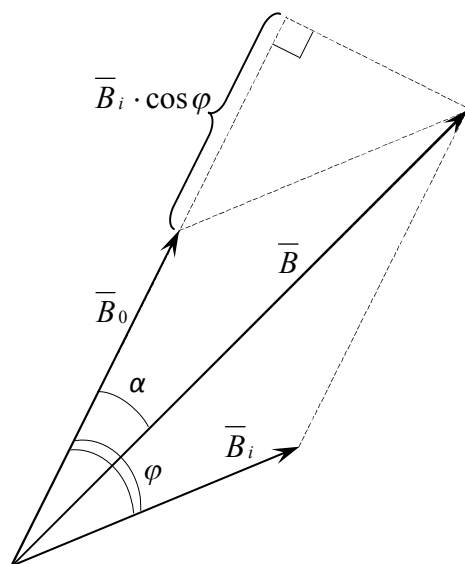


Рисунок 1 – Конфигурация магнитных полей МЭГ.

Чувствительность датчика определяется для ферритов с малой константой анизотропии из условия ферромагнитного резонанса. Для слабых магнитных полей (порядка  $H \leq 1$  ( $\mathcal{H} \leq 10^{-4}$  Тл)) изменение частоты составляет 2,8 МГц/Э.

Высокая чувствительность к изменению магнитного поля (индукция магнитного поля Земли составляет величину порядка  $40 \cdot 10^3$  нТл (0,4 Гс) и относится к слабым магнитным полям), являющаяся основной характеристикой датчика, приводит к тому, что датчик реагирует на изменения окружающего его магнитного поля, включая помехи от разного рода источников. Эти источники могут быть как естественного (магнитные бури), так и искусственного происхождения (линии электропередач).

Глава 2 Подавление магнитных помех кольцевыми экранами из немагнитных материалов

Для подавления внешних быстропеременных магнитных помех могут быть использованы цилиндрические экраны, выполненные из немагнитных проводящих материалов. Центр такого цилиндра должен совпадать с магниточувствительным элементом датчика, а его ось – с направлением измеряемой компоненты магнитного поля.

$$B = B_m + B_{нч} + \cancel{B_{вч}}$$

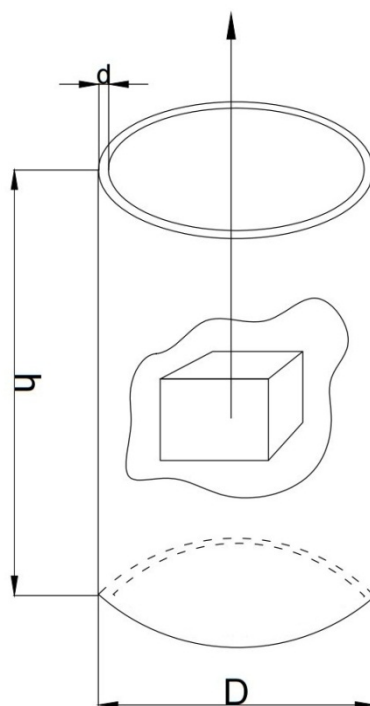


Рис. 2 Магнитоэлектронный датчик внутри кольцевого немагнитного экрана

Подавление магнитных помех происходит в результате возникновения в кольце индукционного тока и, как следствие, магнитного поля с индукцией  $B_{инд}(t)$ . В случае, если внешняя магнитная помеха носит гармонический характер, то индукция магнитного поля, являющаяся результатом векторного сложения  $B_{внеш}(t)$  и  $B_{инд}(t)$ , может быть представлена в виде

$$B_{действие}(t) = B_{внеш}(t) - B_{инд}(t) = \beta B_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Коэффициент подавления помех определяется как  $\Gamma = \frac{1}{\beta}$ .

Коэффициент подавления помех зависит от геометрических размеров экрана (толщины, радиуса, высоты), а также от частоты помехи.

$$\beta = \sqrt{\left(1 - \frac{\pi\mu_0 D}{4L} \cdot \left(1 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2}\right)^{-1}\right)^2 + \frac{R^2}{\omega^2 L^2}} \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр,  $L$  – индуктивность,  $R$  – омическое сопротивление кольца, а  $\omega$  – частота гармонической помехи.

Немагнитные цилиндрические экраны снижают влияние высокочастотных помех на показания датчика, в результате он регистрирует только медленные изменения магнитного поля. Данный способ применим к любого рода высокочувствительным датчикам слабых магнитных полей.

Глава 3. Применение немагнитных цилиндрических экранов для защиты датчика слабых магнитных полей от внешних магнитных помех

В работе представлены результаты теоретических исследований зависимости коэффициента подавления помех для различных частот (от 200 до 2000 Гц) и для различных размеров экранирующих цилиндров из алюминия. Установлено, что для данного материала оптимальная высота цилиндра 10 см, толщина стенок 2 мм, диаметр цилиндра следует изменять в пределах от 5 до 30 см. При этом коэффициент подавления помех возрастает с увеличением частоты помехи. Особенно заметно эффект подавления проявляется при частотах выше 1300 Гц (рис.3.1, 3.2).

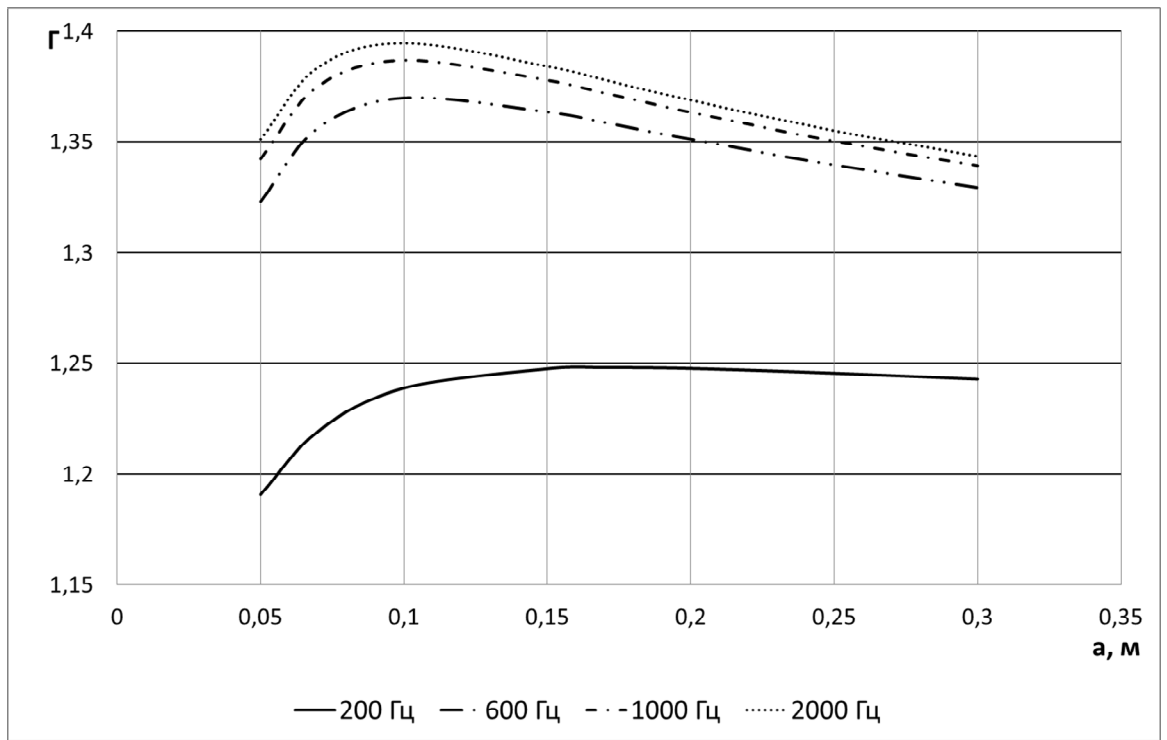


Рис. 3 Зависимость коэффициента подавления помех  $\Gamma$  от радиуса  $a$  цилиндра для различных частот

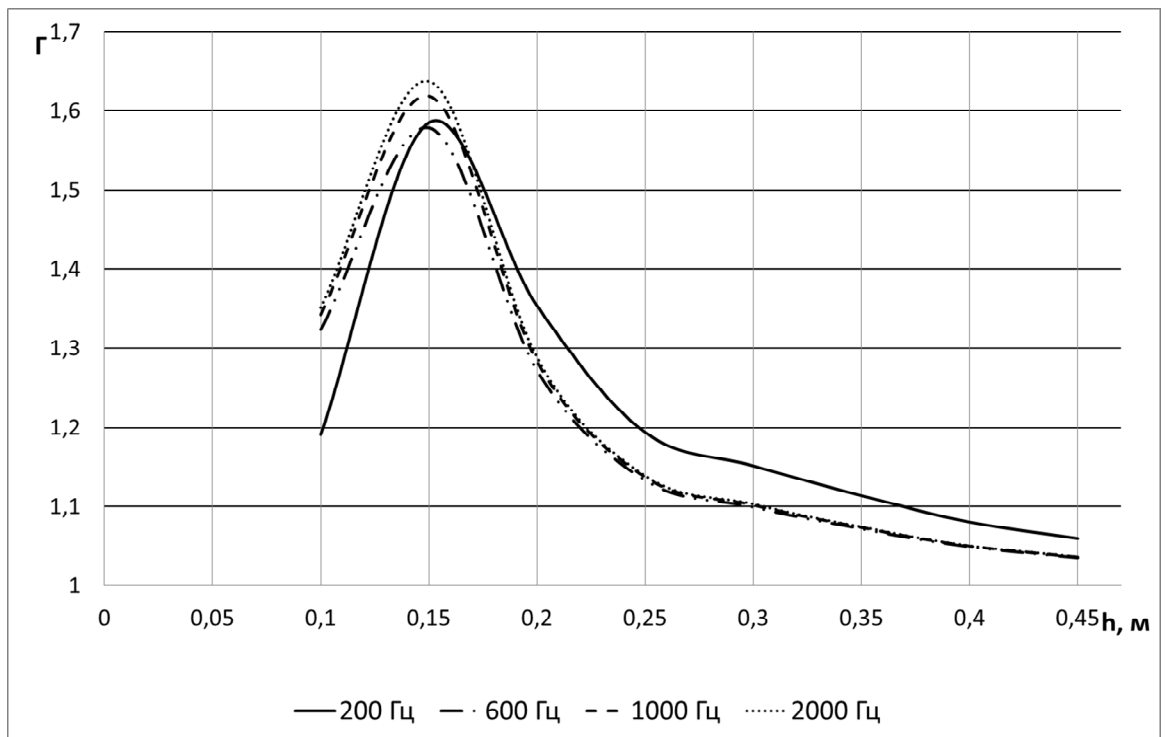


Рис. 4 Зависимость коэффициента подавления помех  $\Gamma$  от высоты  $h$  цилиндра для различных частот

Экспериментальные исследования по применению немагнитных экранов для подавления внешних магнитных помех и защиты датчика магнитного поля проводились с цилиндрами, высоты и толщины которых соответствовали результатам теоретических исследований и :  $h = 10 \div 15$  см,  $d = 2 \div 3$  мм,  $a = 3 \div 4$  см.

Гармоническая внешняя магнитная помеха создавалась искусственно с помощью рамки с намотанной проволокой, частота такой помехи регулировалась в необходимых диапазонах. Схема и фото установки представлены на рис. 5, 6

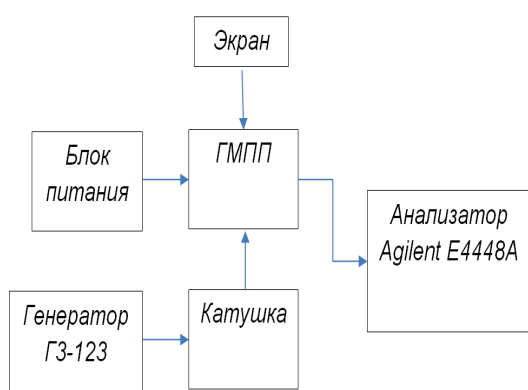
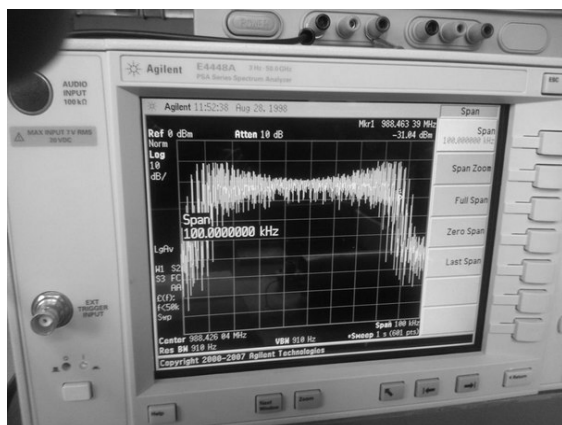


Рис. 5 Схема установки

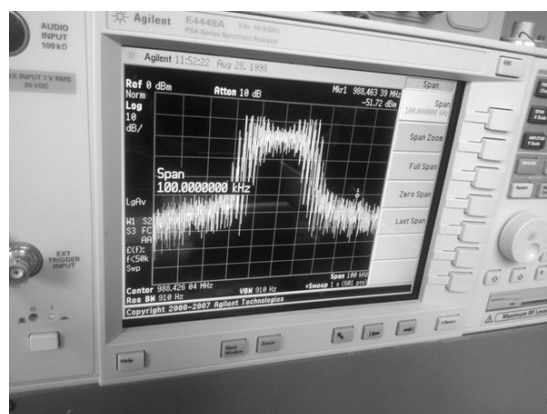


Рис. 6 Фото установки

Коэффициент подавления помех  $\Gamma$  определялся как отношение ширины спектра ГМПП без экрана к ширине спектра ГМПП с экраном (рис. 7).



а)



б)

Рис. 7 Сигнал ГМПП при частоте помехи 0,6 кГц:

а – без экрана; б – с экраном



Эксперимент проводился с цилиндрами, выполненными из алюминия и меди. Графики зависимости коэффициента подавления помех от частоты помехи представлены на рис. 8, 9

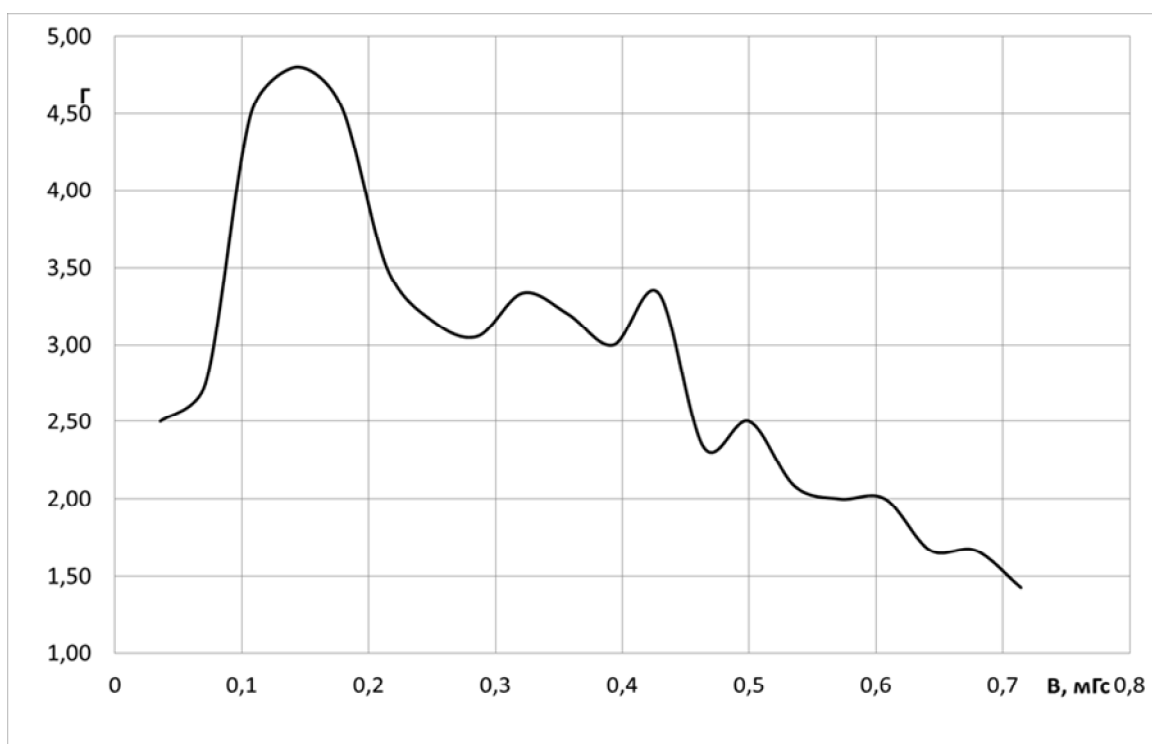


Рис. 8 Зависимость коэффициента подавления помех от индукции помехи для экрана из алюминия

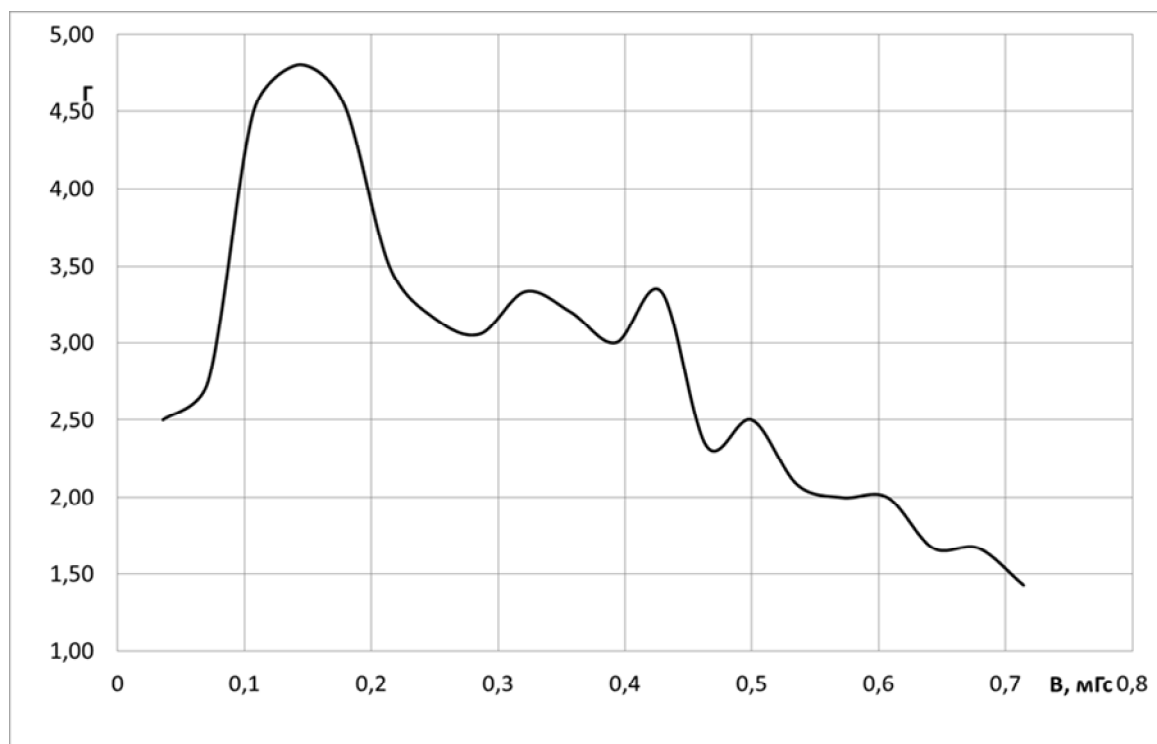


Рис. 9 Зависимость коэффициента подавления помех от индукции помехи для экрана из меди

Видно, что для экрана из алюминия значения коэффициента подавления помех меняются в пределах от 1,5 до 3,2. Наибольшие значения достигаются при частоте помехи 500 Гц.

Для экрана из меди значение коэффициента подавления помех максимально при частоте помехи около 500 Гц и составляет  $\Gamma=4,7$ . С ростом частоты до 2 кГц коэффициент подавления уменьшается до 1,5.

В работе проведены исследования зависимости коэффициента подавления помех от взаимной ориентации экрана и датчика.

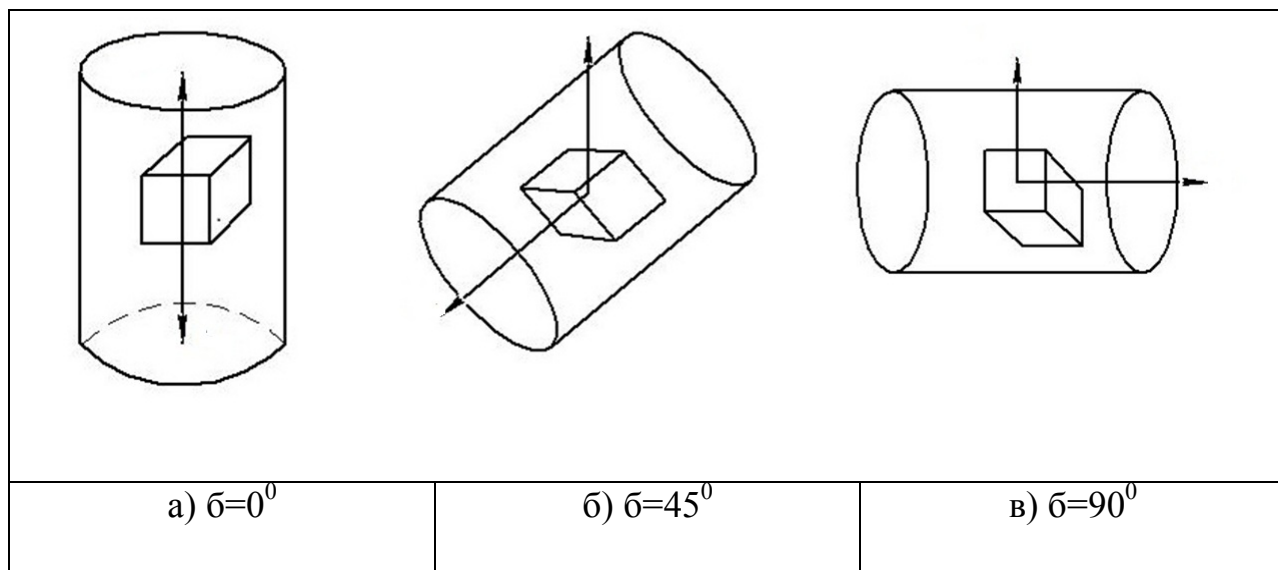


Рис. 10 Взаимная ориентация экрана и датчика

На рис. 11, 12 представлены результаты экспериментов, проведенных при различных углах между осью цилиндра и направлением поля подмагничивания датчика.

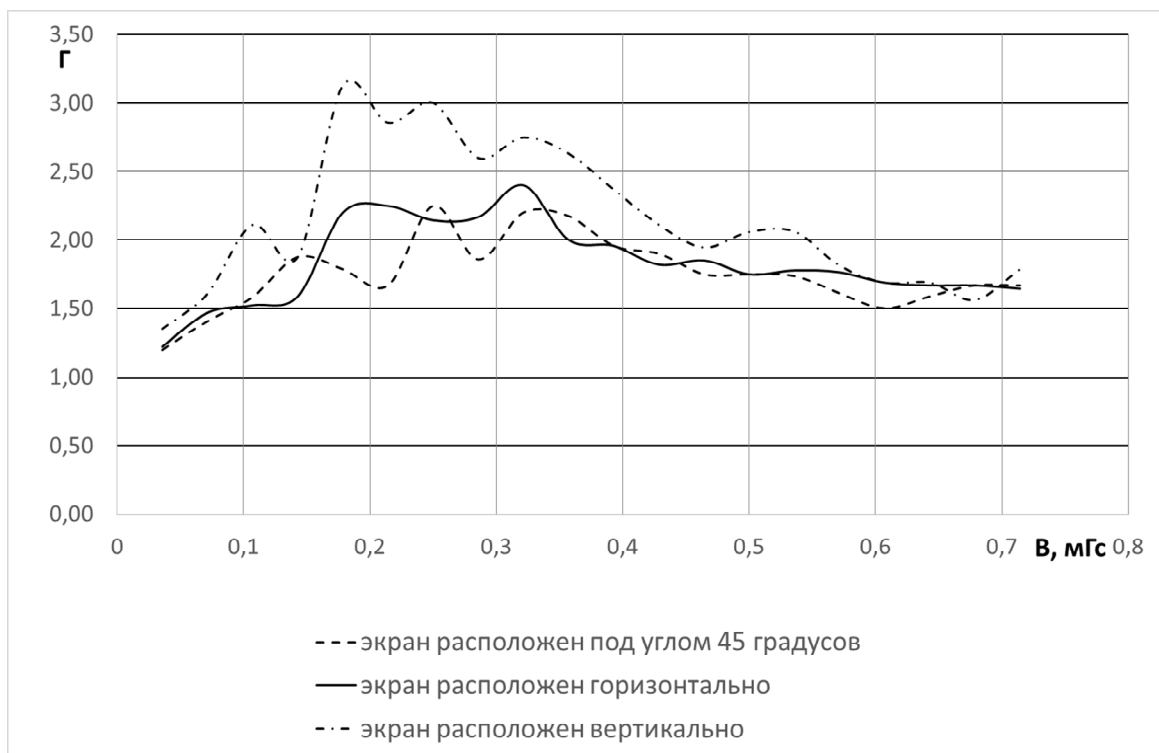


Рис. 11 Зависимость коэффициента экранирования от частоты помехи для алюминия

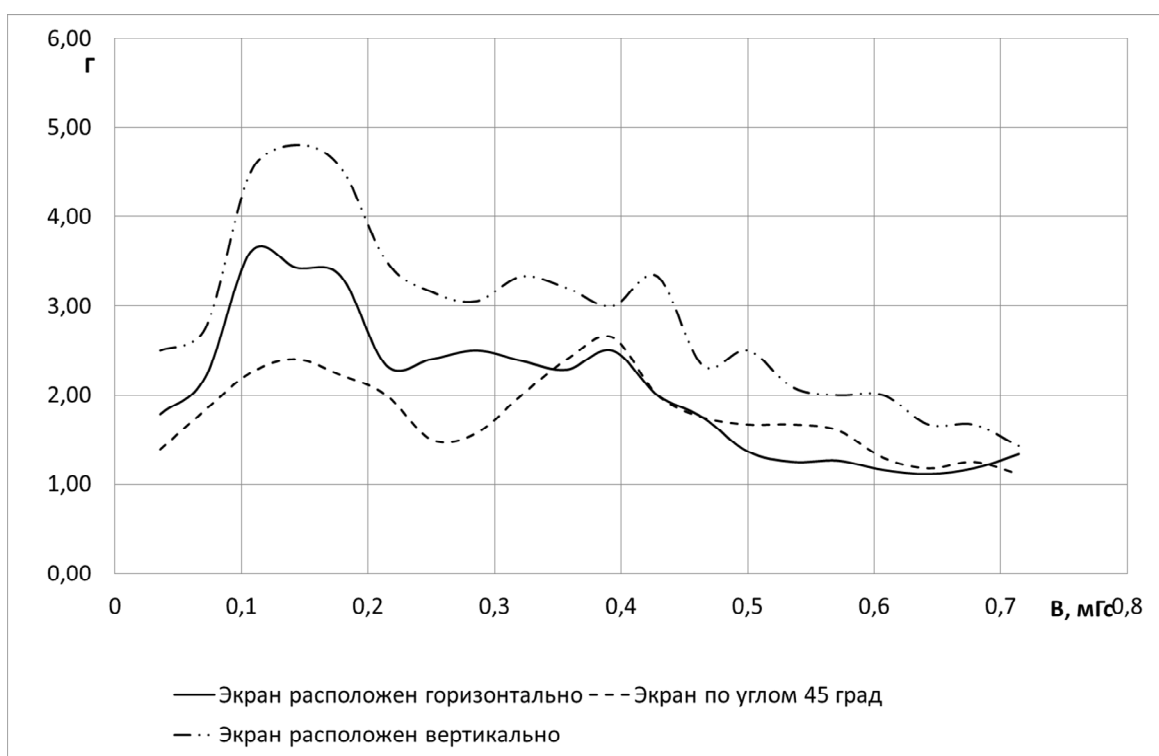


Рис. 12 Зависимость коэффициента экранирования от частоты помехи для меди

Показано, что при смещении оси цилиндра относительно оси датчика происходит уменьшение коэффициента подавления помех.

В работе проведены теоретические и экспериментальные исследования по применению немагнитных кольцевых экранов (цилиндрических экранов) для защиты датчиков слабых магнитных полей от воздействия внешних магнитных помех гармонического характера.

В результате теоретических исследований зависимости коэффициента подавления помех от размеров алюминиевого экрана для датчика, габариты которого составляют приблизительно  $2,5 \times 3 \times 2,5 \text{ см}^3$ , установлено, что оптимальная высота такого цилиндра 10 см, толщина стенок 2 мм, диаметр цилиндра можно изменять в пределах от 5 до 30 см.

Теоретические исследования зависимости коэффициента подавления помех от частоты внешней гармонической помехи показали, что с ростом частоты значения коэффициента подавления увеличивается. Исследования проводились для диапазона частот от 50 Гц до 2 кГц.

В тех же диапазонах частот были проведены экспериментальные исследования по применению немагнитных цилиндров из меди и алюминия, с размерами, не превышающими установленных ранее теоретически. Была исследована зависимость коэффициента подавления помех от частоты помехи и от взаимной ориентации датчика и экрана в пространстве.

Показано, что при смещении оси цилиндра относительно оси датчика происходит уменьшение коэффициента подавления помех.

При применении экрана из алюминия значения коэффициента подавления помех меняются в пределах от 1,5 до 3,2. Наибольшие значения достигаются при частоте помехи 500 Гц.

Для экрана из меди значение коэффициента подавления помех максимально при частоте помехи около 500 Гц и составляет  $\Gamma=4,7$ . С ростом частоты до 2 кГц коэффициент подавления уменьшается до 1,5.

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований показано, что применение немагнитных кольцевых экранов позволяет достигнуть значений коэффициента подавления до 4,7.

Экранирование подобного рода применимо не только к датчикам слабых магнитных полей на основе ФМР, но и к имеющим другие принципы работы.

Список основных использованных источников информации:

1. *Кочемасов Ю.Н., Колегаев Ю.Б.* Сравнительный анализ характеристик датчиков магнитного поля. // Датчики и системы № 4. 2001г.
2. *Гуревич А.Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука. 1973.
3. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Магнитоэлектроника СВЧ-, КВЧ-диапазонов в пленках ферритов. М.: Наука, 2005. 380 с.
4. *Гурзо В.В., Игнатъев А.А., Ляшенко А.В.и др.* Векторный магнитометр малых магнитных полей // Гетеромагнитная микроэлектроника: Сб. докл. и ст. научн.-техн. совещ. / Под общ. ред. проф. А.А.Игнатъева. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2004. – Вып. 1. Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов. – С. 50-52.
5. *Игнатъев А. А., Ляшенко А. В.* Гетеромагнитная микроэлектроника. Микросистемы активного типа. М.: Наука, 2007. 612 с.
6. *Гроднев И.И.* Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. – М.: Связь, 1972. – 112 с.
7. *О.С. Островский, Е.Н. Одаренко, А.А. Шматько* Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн // ФП ФИП PSE, 2003, том 1, № 2, vol. 1, No. 2. Pp 161-173.
8. *Шапиро Д.Н.* Электромагнитное экранирование. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 120 с.
9. *Воробьев Е.А.* Экранирование СВЧ конструкций. – М.: Советское радио, 1979. – 136 с.
10. *Романченко Л.А.* Подавление быстропеременных магнитных полей в

устройствах (системах) измерения слабых магнитных полей / М.Н.Куликов, Л.А.Романченко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007г. №5. С.43–46.

11. *Игнатьев А.А., Романченко Л.А., Солопов А.А., Зайцева Е.С.* Применение немагнитных цилиндрических экранов для подавления гармонических магнитных помех //Гетеромагнитная микроэлектроника. Сб. докл. и ст. научн.-техн. совещ. / Изд-во Саратов. ун-та – Саратов, 2014. – Вып. 16 - Гетеромагнитная микро- и нанoeлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности - С. 37 - 42