

Измеритель коэффициента экранирования нелинейного магнетика

А.Ф. Васильев, И.В. Негинский, А.Л. Якимец

Волгоградский государственный университет, Волгоград

Аннотация: В статье описан прибор, предназначенный для измерения коэффициента экранирования магнитного поля в ближней зоне и зависимость его от частоты изменения магнитного поля. Измерение коэффициента экранирования производится с учетом нелинейности характеристик материала, из которого изготовлен магнитный экран. Модуль формирования тестового воздействия задает ток, протекающий через катушку, содержащий суперпозицию постоянного и переменного сигналов. Наличие постоянной составляющей в тестовом воздействии позволяет компенсировать внешнее постоянное или медленно меняющееся магнитное поле и тем самым уменьшить погрешность определения коэффициента экранирования. Приведены результаты измерения частотной зависимости коэффициента экранирования магнитного поля в ближней зоне, а также основные характеристики созданного прибора.

Ключевые слова: коэффициент экранирования, нелинейный магнетик, измеритель коэффициента экранирования, магнитометрия, цифровой аттенюатор, холловский магнитометр, метод Прони, компенсация магнитного поля, экран, измеритель.

Введение

При проведении магнитных измерений и испытаний высокочувствительных магнитометрических приборов, а также при их эксплуатации, нередко точность проводимых исследований значительно снижается из-за высокого уровня магнитных помех, создаваемых естественными вариациями магнитного поля, электромагнитными полями промышленных установок, высоковольтных линий электропередач, бытовой электросети, движущимися магнитными массами. Наличие электромагнитных помех необходимо также учитывать при проектировании чувствительных блоков радиоэлектронной аппаратуры, чтобы обеспечить возможность разделения сигналов, а при наличии существенно нелинейных элементов и материалов – чистоту спектрального состава сигнала [1].

Можно выделить три основных способа снижения влияния магнитных помех на функционирование радиоэлектронных модулей [1, 2]:

1. проектирование печатных узлов устройств с учетом обеспечения необходимой помехоустойчивости узлов;

2. использование специально спроектированных экранов из проводящих, ферромагнитных или сверхпроводящих материалов;

3. компенсация постоянных или медленно меняющихся магнитных полей.

Обычно при проектировании радиоэлектронных систем одновременно используется несколько способов снижения влияния магнитного поля на работоспособность устройства.

Методы

Качество экранирования при использовании экранов зависит, в основном, от геометрии экрана, спектрального состава помехи и материала, из которого он изготовлен.

Наиболее эффективно в ближней зоне использовать ферромагнитные и сверхпроводящие материалы [3]. Но магнитная восприимчивость ферромагнитных и сверхпроводящих материалов существенно нелинейна. В отклике материала на переменное внешнее магнитное поле появляются высшие гармоники. Эффект наблюдается экспериментально как на низких частотах, так и в диапазоне СВЧ, в массивных и в пленочных образцах [4, 5].

Если пренебречь явлениями анизотропии и гистерезиса, магнитный поток Φ , охваченный экраном, является нелинейной нечетной функцией внешнего магнитного поля [6]:

$$\Phi = f(H) = \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1} H^{2n+1} = a_1 H + a_3 H^3 + \dots$$

Если помеха помимо переменной составляющей $H_1 \cos(\omega_1 t)$ содержит постоянное или медленно меняющееся поле H_0 , то для потока, охваченного экраном, получаем:

$$\begin{aligned} \Phi(t) &= a_1[H_0 + H_1 \cos(\omega_1 t)] + a_3[H_0 + H_1 \cos(\omega_1 t)]^3 + \dots = \\ &= \left[a_1 H_0 + a_3 H_0^3 + \frac{3}{2} a_3 H_0 H_1^2 \right] + \left[a_1 H_1 + 3 a_3 H_0^2 H_1 + \frac{3}{4} a_3 H_1^3 \right] \cos(\omega_1 t) + \\ &\quad + 3 a_3 H_0 H_1^2 \cos(2\omega_1 t) + \frac{1}{4} a_3 H_1^3 \cos(3\omega_1 t) + \dots \end{aligned}$$

Величина напряжения, наведенного на контур может достигать величины 0,8 мВ при напряженности внешнего магнитного поля 10 мА/м при использовании экрана из керамического сверхпроводника [6]. Таким образом, использование магнитных экранов приводит к существенному искажению спектрального состава помехи.

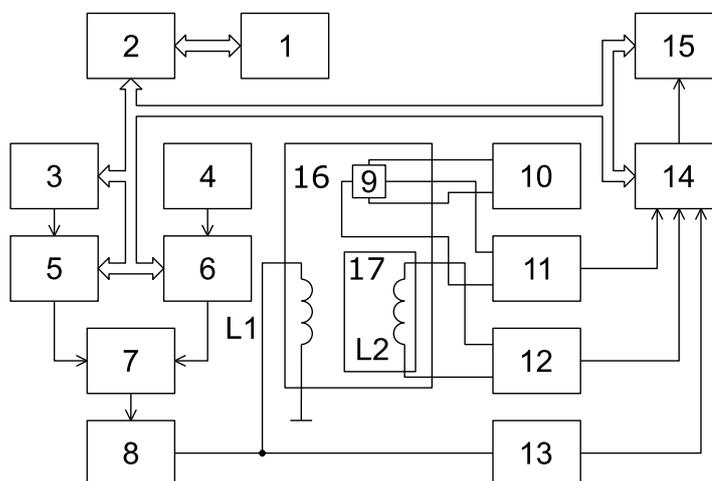


Рис. 1. – Функциональная схема измерителя коэффициента экранирования. На рисунке обозначено: 1 – персональный компьютер, 2 – микроконтроллер, 3 – генератор, 4 – источник опорного напряжения, 5, 6 – регулируемый аттенюатор, 7 – сумматор, 8 – источник тока, управляемый напряжением, 9 – датчик Холла, 10 – источник тока, 11, 12, 13 – усилитель, 14 – переключатель, 15 – аналого-цифровой преобразователь, 16 – электростатический экран, 17 – исследуемый экран.

Нелинейность магнитной восприимчивости является только одним из факторов, который необходимо учитывать при проектировании магнитных экранов для прецизионных магнитных измерений и при проектировании чувствительных блоков радиоэлектронных схем [7, 8]. Среди других

факторов, влияющих на эффективность магнитных экранов, следует отметить геометрию экрана, частотную зависимость характеристик материала. Как результат, расчет магнитных экранов в ближней зоне является нетривиальной задачей и обычно при проектировании экранов используются эмпирические выражения.

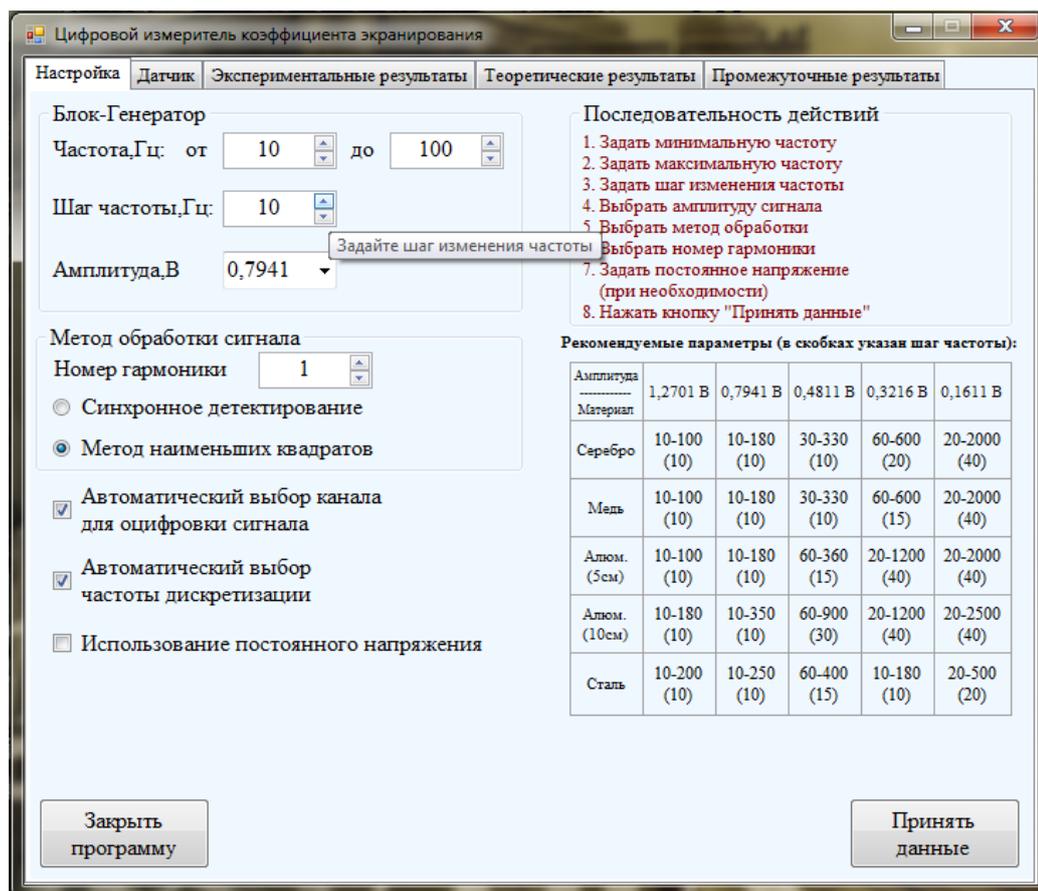


Рис. 2. – Внешний вид интерфейсной программы при активной вкладке «Настройка»

Вместе с тем существует ряд задач, связанных с прецизионными магнитными измерениями, когда требуется более точная информация о величине ослабления магнитной помехи экраном с учетом нелинейности характеристик материала, из которого изготовлен экран. В этом случае, оптимальным решением будет использование специально разработанного прибора, позволяющего провести измерения коэффициента экранирования. На рис. 1 представлена функциональная схема подобного устройства.

В устройстве используется взаимноиндуктивный метод. Основой измерительной установки являются две катушки индуктивности: создающая магнитное поле $L1$ и измерительная $L2$, расположенная внутри исследуемого магнитного экрана (17). Катушка, генерирующая магнитное поле, имеет размер, обеспечивающий однородность магнитного поля в области, где располагается исследуемый экран. Обе катушки помещены в электростатический экран (16). Внутри экрана также расположен датчик Холла, используемый для измерения постоянной составляющей магнитного поля. Прибор работает под управлением персонального компьютера (1), который формирует необходимые управляющие команды и представляет измеренные данные с использованием специально разработанного программного обеспечения (рис. 2).

После включения установки, формируются и передаются команды контроллеру (2) от персонального компьютера (ПК). Получив команду о начале измерений, микроконтроллер запускает процедуру, выполняющую компенсацию постоянного магнитного поля. Для этого производится измерение величины постоянного магнитного поля с использованием холловского магнитометра. Источник (10) задает через датчик Холла ток. Напряжение с датчика Холла (9) усиливается (11) и подается на вход переключателя (14), который управляется микроконтроллером. Коммутатор подключает выход усилителя (11) ко входу аналого-цифрового преобразователя (АЦП). После окончания преобразования цифровой эквивалент измеренного напряжения считывается контроллером. Полученное значение используется для вычисления постоянного тока компенсирующее внешнее постоянное магнитное поле.

На основе измеренной величины постоянного магнитного поля вычисляется коэффициент ослабления регулируемого аттенюатора (6), на вход которого подается напряжение с источника опорного напряжения.

Усиленный сигнал подается на вход сумматора (7), напряжение с выхода которого преобразуется в ток источником тока, управляемого напряжением (8). Сформированный таким образом ток, протекает через соленоид L1, частично компенсируя внешнее постоянное или медленно меняющееся магнитное поле. Результирующее магнитное поле измеряется повторно холловским магнитометром и, в случае необходимости, корректируется.

После окончания процедуры компенсации внешнего магнитного поля, микроконтроллер (2) формирует управляющие сигналы для генератора сигналов (3). Выбирается форма сигнала, его частота и начальная фаза. Сгенерированный гармонический сигнал подается на вход регулируемого усилителя (5), коэффициент усиления для которого задается управляющим микроконтроллером. Усиленное напряжение подается на другой вход сумматора напряжений (7). Напряжение с выхода сумматора, содержащее переменную и постоянное составляющие, подается на вход источника тока управляемого напряжением (8). Выходной ток протекает через полезадающую катушку L1.

Напряжение с измерительной катушки L2, помещенной в исследуемый экран, подается на вход усилителя (12). Усиленный сигнал подается на вход переключателя (14), управляемого микроконтроллером. Далее напряжение поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (15). Цифровой эквивалент измеренного напряжения считывается микроконтроллером и передается в персональный компьютер для дальнейшего анализа.

Для контроля тока через полезадающую катушку и, следовательно, величины создаваемого магнитного поля, падение напряжения на катушке L1, подается на вход усилителя (13). Усиленное напряжение через коммутатор (14) поступает на вход АЦП (15).

Персональный компьютер накапливает отсчеты сигналов с катушек L1 и L2. Далее программно определяются амплитуды гармоник с

использованием метода Прони [9]. Для этого последовательность отсчетов представляется в следующем виде:

$$x[n] = \hat{x}[n] + \varepsilon[n], \quad n = \overline{0, N-1},$$

где N – количество отсчетов, n – номер отсчета, $x[n]$ – значение отсчета, $\hat{x}[n]$ – аппроксимирующая зависимость вида:

$$\begin{aligned} \hat{x}[n] &= A \cos(k\omega_0 n\Delta t + \varphi_0) = A \cos(\varphi_0) \cos(k\omega_0 n\Delta t) + A \sin(\varphi_0) \sin(k\omega_0 n\Delta t) = \\ &= A_1 \cos(k\omega_0 n\Delta t) + A_2 \sin(k\omega_0 n\Delta t) \end{aligned}$$

где ω_0 – основная частота сигнала, k – номер гармоники, Δt – шаг дискретизации по времени, φ_0 – начальная фаза, A – амплитуда гармоники.

Минимизируя $p(A_1, A_2) = \sum_{n=0}^{N-1} |\varepsilon[n]|^2$ для определения A_1 и A_2 , находим амплитуду гармоники:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}.$$

Использование метода Прони для определения амплитуд гармоник измеряемого сигнала позволяет обеспечить необходимую точность измерения, а также обеспечить частотную селекцию сигнала [10, 11].

После определения амплитуд гармоник напряжений на ползадающей и измерительной катушках, вычисляется коэффициент экранирования на заданной частоте:

$$K_{\text{Э}} = \frac{H_{\text{внутр}}}{H_{\text{внешн}}} = \frac{K_1 U_2}{K_2 U_1 \mu_0 S N n},$$

где U_2 – амплитуда определяемой гармоники, на выходе измерительной катушки, U_1 – напряжение на токовой катушке, K_1 – коэффициент усиления напряжения, измеренного на токовой катушке, K_2 – коэффициент усиления сигнала с измерительной катушки, n – плотность намотки токовой катушки, N – количество витков в измерительной катушке, S – ее площадь поперечного сечения.

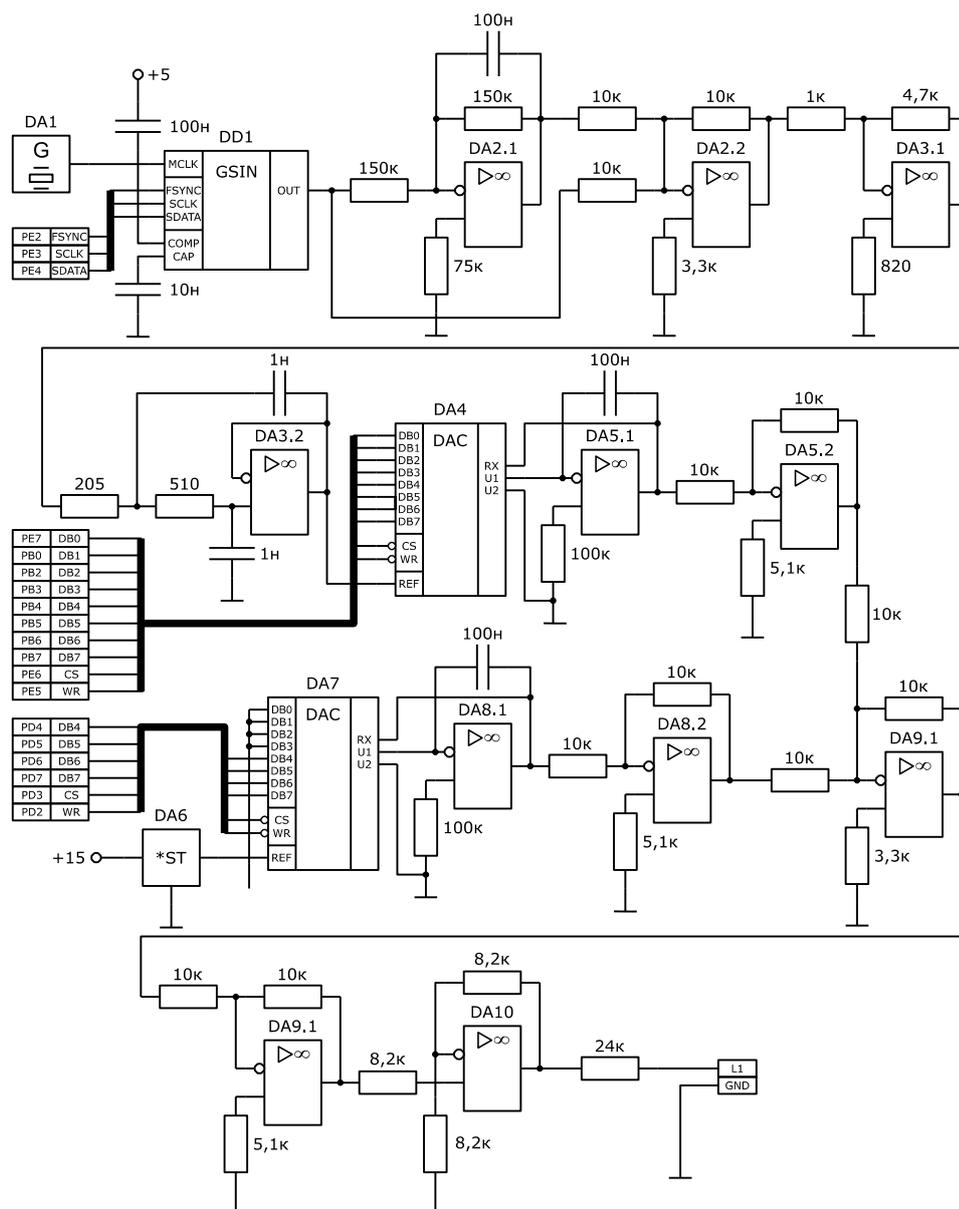


Рис. 3. – Схема электрическая принципиальная модуля формирования тока в ползущей катушке. На схеме обозначено: G1 - ГК296-П1-М-Ф-5С-25М;
DD1 - AD9833; DA1, DA2, DA4, DA7, DA8 - AD712; DA3, DA6 - AD7524;
DA5 - REF5050AID; DA9 – OPA549

Окончив измерение, персональный компьютер формирует последовательность команд для микроконтроллера необходимую для определения коэффициента экранирования на другой частоте. Описанная процедура продолжается до тех пор, пока не будет измерена зависимость

величины коэффициента экранирования от частоты помехи для заданного диапазона частот.

Результаты

На рис. 3 представлена схема электрическая принципиальная модуля формирования тока в ползадающей катушке L1. Схему условно можно разделить на две части – формирования постоянной и переменной составляющих тока.

В качестве опорного генератора используется модуль ГК296-П1-М-Ф-5С-25М с частотой равной 25 МГц. Тактовый сигнал подается на вход цифрового синтезатора частот DD1, управление которым осуществляется по трехпроводному интерфейсу SPI. Сигнал с выхода генератора подается на вход схемы смещения постоянного напряжения, собранного на элементах DA1.1, DA1.2. Данная схема функционирует, как активный фильтр (ФВЧ) с нулевым сдвигом фаз во всем диапазоне работы операционных усилителей, что критично для работы схемы в области низких частот. Далее напряжение усиливается (DA2.1) и подается на вход фильтра нижних частот (DA2.2). Фильтр имеет частоту среза, равную 800 кГц. Отфильтрованное напряжение поступает на вход цифрового аттенюатора, собранного на элементах DA3, DA4.1. Далее, сигнал с выхода аттенюатора через буфер DA4.2 подается на вход сумматора, собранного на операционном усилителе DA8.1. На второй вход сумматора подается постоянное напряжение, пропорциональное внешнему магнитному полю.

Постоянное напряжение, пропорциональное напряженности внешнего медленно изменяющегося магнитного поля, формируется с помощью элементов DA5-DA7. Сигнал с выхода источника опорного напряжения DA5 является опорным для цифроаналогового преобразователя DA6-DA7.1. Напряжение с выхода ЦАП через буфер DA7.2, с единичным коэффициентом усиления, подается на второй вход сумматора.

Выход сумматора через буфер подключен ко входу источника тока (DA9), управляемого напряжением (ИТУН). Выходной ток ИТУН протекает через полезадающую катушку, задавая магнитное поле. Катушка имеет следующие характеристики: длина – 225 мм, диаметр – 125 мм, количество витков – 600.

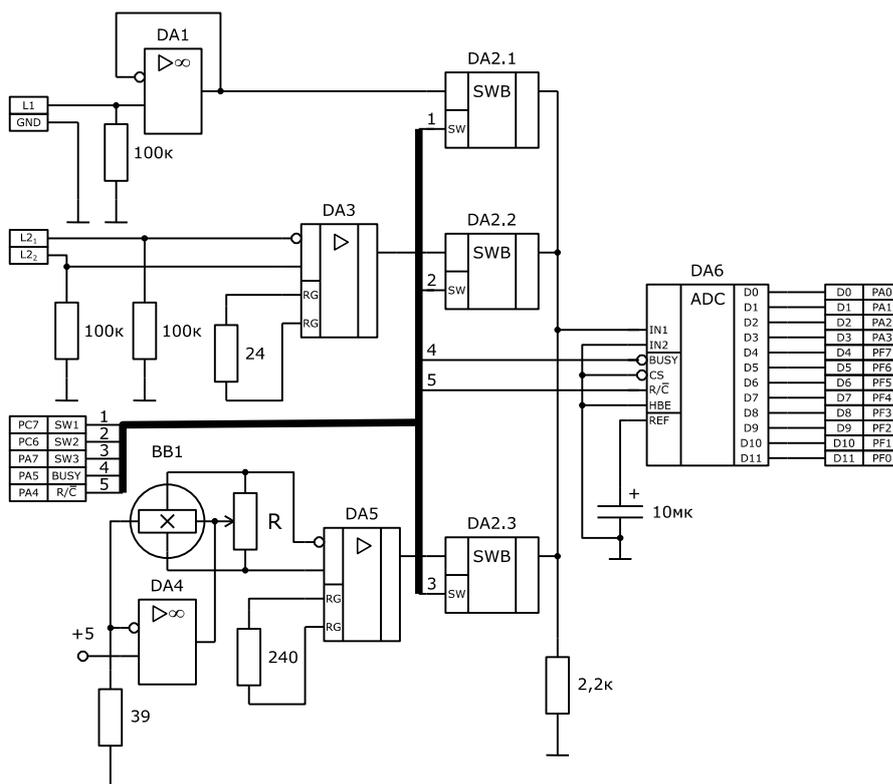


Рис. 4. – Схема электрическая принципиальная измерительного модуля. На схеме обозначено: DA1 – NE5534; DA2 – KP590KH5; DA3, DA5 – INA128; BB1 - ПХЭ60117; DA4 – AD8531; DA6 – ADS7800

Схема электрическая принципиальная измерительного модуля представлена на рис. 4. Данную схему можно условно разделить на три части:

1. схема измерения напряжения на полезадающей катушке;
2. усилитель напряжения с измерительной катушки;
3. холловский измеритель напряженности магнитного поля.

Напряжение с ползадающей катушки L1 подается на вход неинвертирующего повторителя DA1, с выхода которого сигнал подается на аналоговый ключ DA2.1. Электронный ключ используется для подключения выхода буфера DA1 ко входу 12-ти разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) DA6.

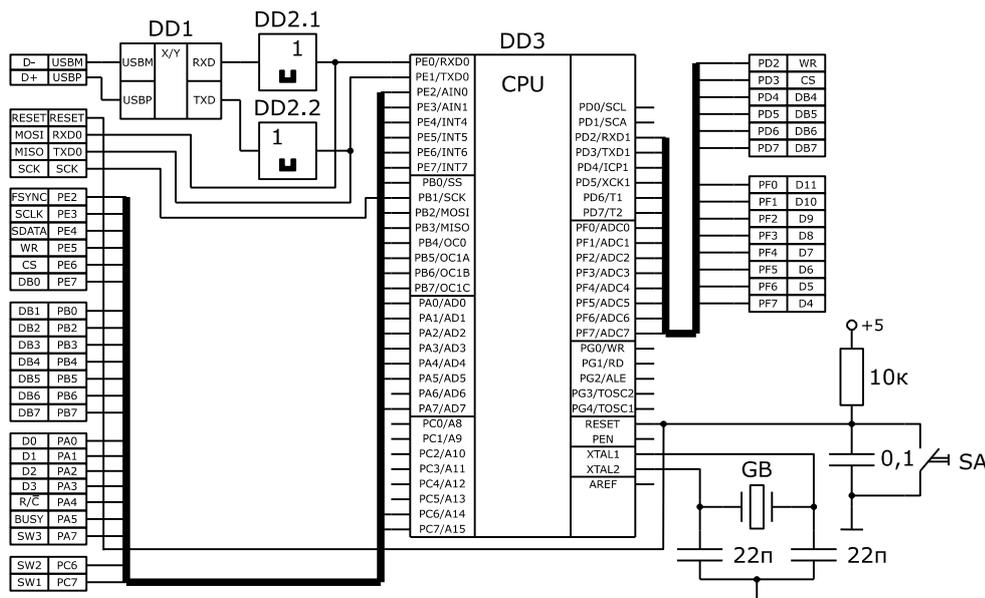


Рис. 5. – Схема электрическая принципиальная управляющего модуля. На схеме обозначено: DD1 – FT232RL; DD2 – ADUM1301; DD3 – ATMEGA128

Напряжение с измерительной катушки L2 подается на вход усилителя DA3. Измерительная катушка имеет диаметр 10 мм, высоту 5 мм и содержит 27 витков. Сигнал с выхода инструментального усилителя через электронный ключ, подается на вход АЦП.

Основой холловского магнитометра является датчик Холла ВВ1. Источник тока, собранный на операционном усилителе DA4, задает ток через датчик величиной 100 мА. Напряжение с потенциальных выводов датчика Холла подается на вход усилителя DA5. Для частичной компенсации остаточного напряжения датчика используется резистор R. После усиления сигнал подается на вход электронного ключа DA2.3, подключающий выход усилителя ко входу аналого-цифрового преобразователя.

На рис. 5 представлена схема электрическая принципиальная управляющего модуля. Микроконтроллер (DD3) генерирует управляющие сигналы на основе команд, формируемых программой, запущенной на персональном компьютере, а также выполняет предварительную обработку измеренных значений. Обмен данными с компьютером осуществляется с использованием универсального синхронно-асинхронного последовательного интерфейса (USART) и преобразователя интерфейса USART-USB (DD1) через устройство гальванической развязки DD2.

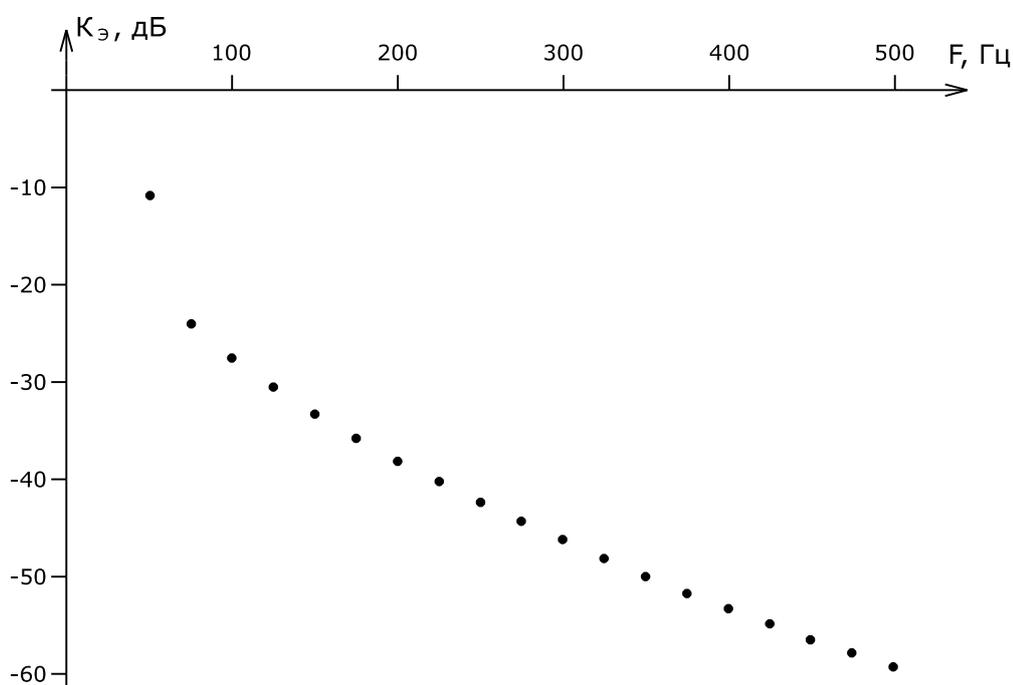


Рис. 6. – Зависимость коэффициента экранирования стального экрана от частоты

Анализ результатов

На рис. 6 представлен пример измерения коэффициента экранирования для первой гармоники помехи стального цилиндрического экрана диаметром 40 мм и толщиной стенок 10 мм. Из рисунка видно, что измеренное значение коэффициента экранирования на частоте 500 Гц составляет величину порядка -60 Дб, что существенно меньше значения полученного с использованием

эмпирических выражений – более 75 Дб [2]. Для обычных измерений подобное отличие не является значимым, но при проведении прецизионных магнитных измерений это может существенно исказить результаты измерений. Кроме того, неверная оценка коэффициента экранирования усложняет задачу частотной селекции сигналов, из-за возникновения в нелинейном магнетике гармоник внешней помехи.

Заключение

Разработанная установка позволяет проводить измерения частотных зависимостей коэффициента экранирования линейных и нелинейных экранов, оцененная погрешность измерения не превосходит 0,5%. Тестовое воздействие на исследуемый экран является суперпозицией постоянного и переменного сигналов, что позволяет уменьшить погрешность измерения, связанную с нелинейностью материала, из которого изготовлен экран. Частота синусоидального сигнала задается в диапазоне 10 Гц - 20 кГц, динамический диапазон тока, протекающего через полезадающую катушку – 0.1-0.7 А. Измерительный модуль, позволяет анализировать сигналы, лежащие в частотном диапазоне до 125 кГц. Конструкция датчика позволяет исследовать экраны в диапазоне частот до 2 кГц в постоянных и переменных полях с напряженностями до 3360 А/м. Использование данного измерителя может быть полезно при проектировании магнитных экранов для калибровки чувствительных магнитометров.

Литература

1. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. Перевод с английского В.А. Исаакяна под редакцией Б.Н. Файзулаева. Москва «Мир», 1990 г. – 237 с.

2. Северцев В.Н., Гулякович Г.Н. Комплексная защита электронных устройств космических аппаратов от электромагнитных помех //



Инженерный вестник Дона, 2017, № 2. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4185

3. Freake S.M., Thorp T.L. Shielding of Low Magnetic Fields with Multiple Cylindrical Shells // Rev. Sci. Instrum. – 1971. – V.42, № 10. – P. 1411–1413

4. Игнатъев В.К., Черных С.В. Исследование нелинейной восприимчивости ВТСП. СФХТ. 1994. Т. 7. № 8 - 9. С. 1411 □ 1416.

5. Gallop J.C., Lilleyman S., Langman C.D., Radcliffe W.J., Gee M. and Stewart M. Novel form of magnetometer using high temperature superconductors. Cryogenics. 28. (1988). № 10. P. 691 - 693.

6. Васильев А.Ф., Якимец А.Л. Исследование взаимодействия взаимно перпендикулярных магнитных полей в ВТСП. Вестник ВолГУ. сер. Физика. Математика. 2015. № 3. С. 55-62

7. Введенский Л.В., Ожогин В.И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. — М.: Наука. Гл. ред. физ.—мат. лит., 1986. — (Соврем. пробл. физики). — 200 с.

8. Бондаренко С.И., Шеремет В.И. Применение сверхпроводимости в магнитных измерениях.— Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 132 с.,ил.

9. Марпл-младший С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. — Москва: Мир, 1990 г. – 265 с.

10. Игнатъев В.К., Гринев С.Н., Никитин А.В., Спектральное оценивание мгновенной частоты сигналов с медленно меняющейся амплитудой Метрология. 2001. № 8. С. 34-45.

11. Глухов А.Ю., Негинский И.В. Цифровой синхронный измеритель поверхностного импеданса// Инженерный вестник Дона, 2012, № 2. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/760

References

1. Barns Dzh. Elektronnoe konstruirovaniye: metody bor'by s pomekhami. [Electronic system design: interference and noise control techniques]. Perevod s angliiskogo V.A. Isaakyana pod redaktsiei B.N. Faizulaeva. Moskva «Mir», 1990. 232 p.
2. Severcev V.N., Gulyakovich G.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4185
3. Freake S.M., Thorp T.L. Shielding of Low Magnetic Fields with Multiple Cylindrical Shells Rev. Sci. Instrum. 1971. V.42, № 10. pp. 1411–1413
4. Ignat'ev V.K., Chernykh S.V. I SFKhT. 1994. T. 7. № 8 - 9. pp. 1411 - 1416.
5. Gallop J.C., Lilleyman S., Langman C.D., Radcliffe W.J., Gee M. and Stewart M. Cryogenics. 28. (1988). № 10. pp. 691 - 693.
6. Vasil'ev A.F., Yakimets A.L. Vestnik VolGU. ser. Fizika. Matematika. 2015. № 3. pp. 55-62.
7. Vvedenskii L.V., Ozhogin V.I. Sverkhchuvstvitel'naya magnitometriya i biomagnetizm. [Hypersensitive magnetometry and biomagnetism]. M.: Nauka. Gl. red. fiz. mat. lit., 1986. (Sovrem. probl. fiziki). 200 p.
8. Bondarenko S.I., Sheremet V.I. Primenenie sverkhprovodimosti v magnitnykh izmereniyakh. [Application of superconductivity in magnetic measurements]. L.: Energomatizdat. Leningr. otd-nie, 1982. 132 p.
9. Marpl-mladshii S.L. Tsifrovoy spektral'nyi analiz i ego prilozheniya [Digital spectral analysis with applications]. Moskva: Mir, 1990. 265 p.
10. Ignat'ev V.K., Grinev S.N., Nikitin A.V., Metrologiya. 2001. № 8. pp. 34-45.
11. Gluhov A.YU., Neginskij I.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/760