

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТОИМПЕДАНСНЫХ ДАТЧИКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2022 г. С.В. Щербинин^{1,2,*}, И.В. Бекетов^{1,2}, К.А. Ярушин²

¹Институт электрофизики УрО РАН, Россия 620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

²Уральский Федеральный Университет, Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: *scher@ier.uran.ru

Поступила в редакцию 29.06.2022; после доработки 27.09.2022

Принята к публикации 07.10.2022

Рассматривается повышение чувствительности магнитоимпедансных (металлических) датчиков магнитного поля за счет включения в высокочастотный резонансный контур. Представлены различные схемы резонансных контуров, позволяющие увеличить чувствительность металлического магнитоимпедансного датчика на частоте 75 МГц. Наилучшие результаты получены для контура с умножением добротности, дающим увеличение коэффициента передачи датчика от напряженности внешнего магнитного поля с 31 %/Э до 132 %/Э при сужении полосы пропускания до 2,5 МГц, что в результате обеспечивает возрастание на порядок отношения сигнал/шум. Данный подход с применением квадратурной демодуляции сигнала позволяет различать сигналы переменного магнитного поля амплитудой 1 нТл при отношении сигнал/шум на уровне 10 дБ. Предложенный метод может быть применен для магнитоимпедансных, магниторезистивных датчиков магнитного поля, а также и для металлических тензометрических датчиков при проведении высокочувствительных измерений.

Ключевые слова: повышение чувствительности, резонансный метод, магнитоимпедансный датчик, квадратурный демодулятор.

DOI: 10.31857/S0130308222120041, EDN: BUXJYU

ВВЕДЕНИЕ

Магнитоимпедансные датчики широко применяются в измерительной технике благодаря малому уровню собственных шумов. В тензометрии используются датчики на основе медно-никелевых, никель-хроможелезных сплавов, нихрома, алюминия и т.п., обладающие сопротивлением в единицы Ом [1]. Для регистрации слабых магнитных полей используются датчики на основе магнитоимпедансного и магниторезистивного эффекта, сопротивление которых может составлять от долей до сотен Ом [2—6].

Одним из путей увеличения чувствительности датчиков является возможность включения датчика в резонансный контур и повышение частоты преобразования сигнала [7, 8], что не исключает использование низкоомных датчиков в мостовых схемах и дифференциальных каскадах [9].

В статье рассмотрен метод повышения чувствительности магнитоимпедансного датчика, включенного в контур с умножением добротности, при работе на частоте 75 МГц в составе детектора с квадратурной демодуляцией сигнала.

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКОВ ЗА СЧЕТ ПЕРЕНОСА СПЕКТРА СИГНАЛА В ВЫСОКОЧАСТОТНУЮ ОБЛАСТЬ

Повышение чувствительности датчиков, как правило, сопровождается увеличением времени формирования сигнала. Таким образом, характерные времена процессов, регистрируемых чувствительными датчиками магнитного поля, варьируются от миллисекунд до десятков секунд. В результате, спектр исследуемых процессов лежит в области т.н. фликкер-шума (рис. 1а). Для регистрации слабых сигналов на фоне шума на низких частотах спектр сигнала датчика необходимо перенести в более высокочастотную область (рис. 1б). Удобным образом для исследований на высоких частотах является микропроволока на основе бериллиевой латуни диаметром 100 мкм с электроосажденным слоем пермаллоя $Fe_{19}Ni_{81}$, толщиной 1 мкм, которая применялась в 1970-х годах для изготовления блоков памяти в компьютерах, таких, например, как UNIVAC [10]. В проводниках на высоких частотах в десятки мегагерц за счет скин-эффекта электромагнитное поле концентрируется в тонком приповерхностном слое. Это позволяет использовать для магнитоимпедансного датчика только внешний слой пермаллоя, обладающий циркулярной анизотропией, а сердцевину микропроволоки изготовить из проводящего материала, обладающего необходимыми механическими свойствами, например, из бериллиевой латуни. Поэтому значительно снижается влияние магнитных шумов, наблюдаемых в сердцевине ферромагнитного провода на высоких частотах [11]. Исследования проведены на частоте

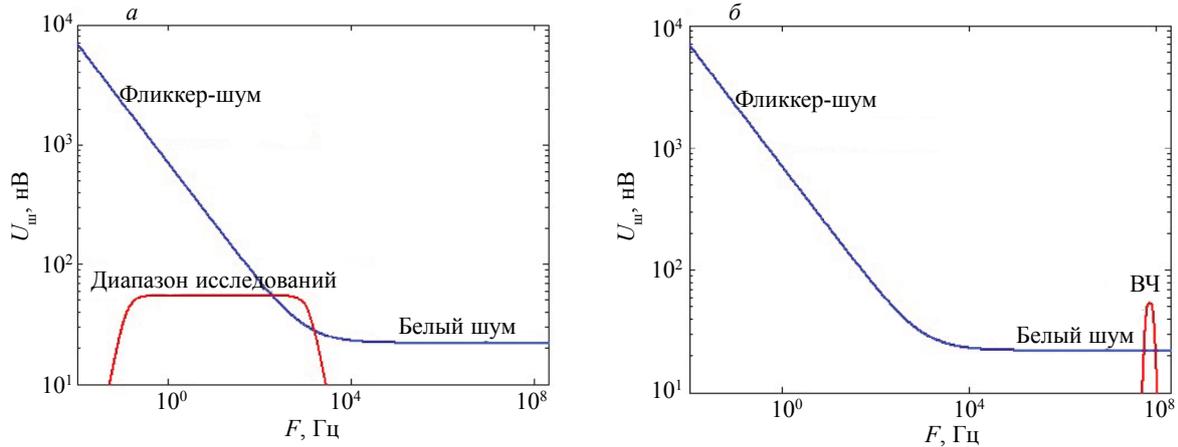


Рис. 1. Спектр полезного сигнала датчика в зоне влияния фликкер-шума (а) и перенос спектра в высокочастотную область (б).

75 МГц (рис. 2), что продиктовано отсутствием вблизи рабочей зоны радиовещательных станций, а также наличием и ценой соответствующей элементной базы.

Измерения с помощью спектроанализатора DSA815-TG позволили определить активную R и реактивную X составляющие импеданса отрезка ферромагнитной проволоки длиной 12 мм на частоте 75 МГц (см. рис. 2). Что, в свою очередь, позволяет определить модуль импеданса $Z = |\dot{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2}$ и аргумент $\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \arg(\dot{Z})$ (рис. 3).

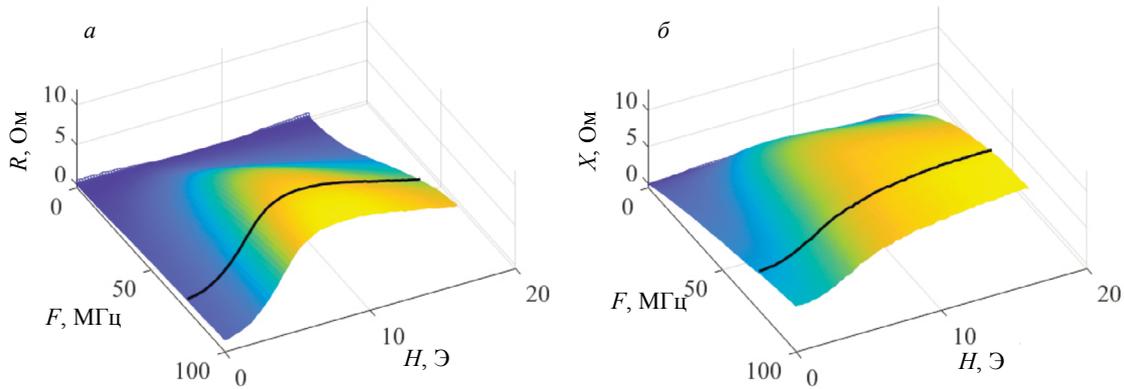


Рис. 2. Активная (а) и реактивная (б) составляющие импеданса проволоки с электроосажденным слоем пермаллоя во внешнем магнитном поле.

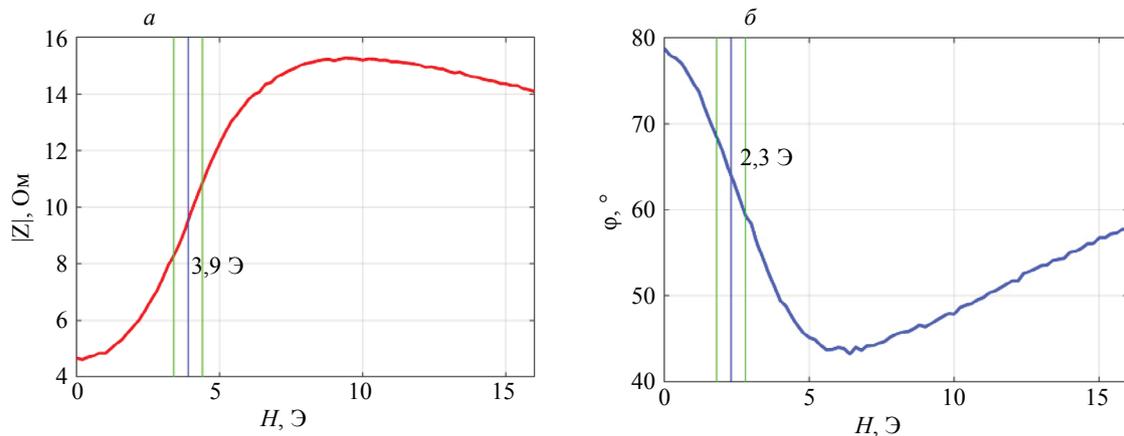


Рис. 3. Модуль (а) и аргумент (б) импеданса чувствительного элемента.

Таким образом, на частоте 75 МГц для обеспечения максимальной чувствительности по модулю импеданса для данного элемента необходимо приложить постоянное поле смещения на уровне 3,9 Э (рис. 3а), а на уровне 2,3 Э — для обеспечения максимальной чувствительности по аргументу (рис. 3б).

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Принципиальная электрическая схема одного из вариантов датчика представлена на рис. 4. Датчик содержит чувствительный элемент Z длиной 12 мм, вставленный в катушку индуктивности, подключенную к прецизионному источнику тока на основе LT3092 с исключительно низкой спектральной плотностью шума $2,7 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$. Источник тока обеспечивает необходимое постоянное поле смещения для достижения максимальной чувствительности на частоте 75 МГц. В состав датчика также входит усилитель высокой частоты, собранный из немагнитных компонентов (рис. 5). Выступ печатной платы с чувствительным элементом вставляется в катушку подмагничивания, содержащую 2200 витков провода ПЭВ-1 диаметром 0,1 мм. Датчик собран в цилиндрическом медном корпусе диаметром 18 мм и длиной 70 мм.

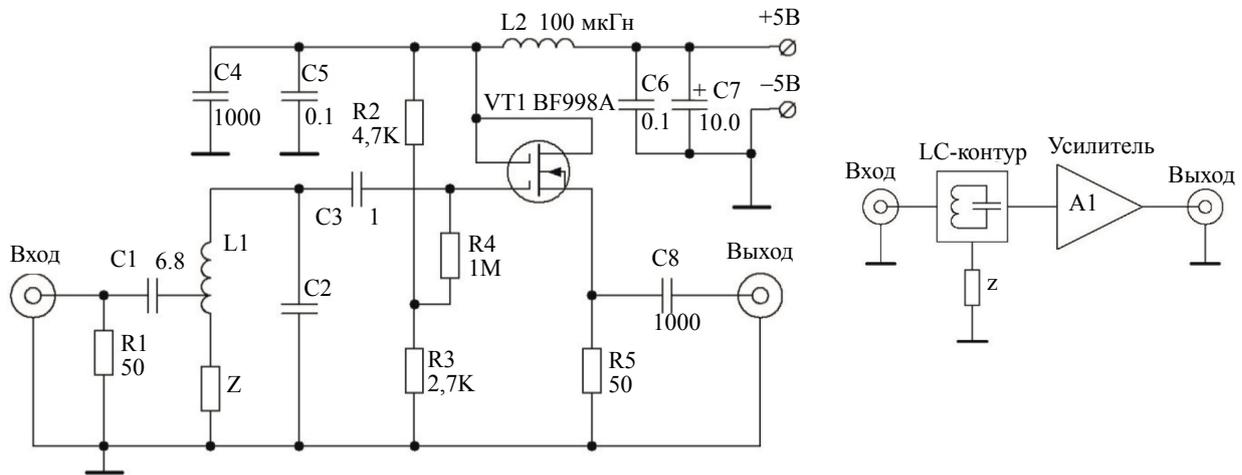


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема датчика с усилителем высокой частоты (а) и соответствующая структурная схема (б).

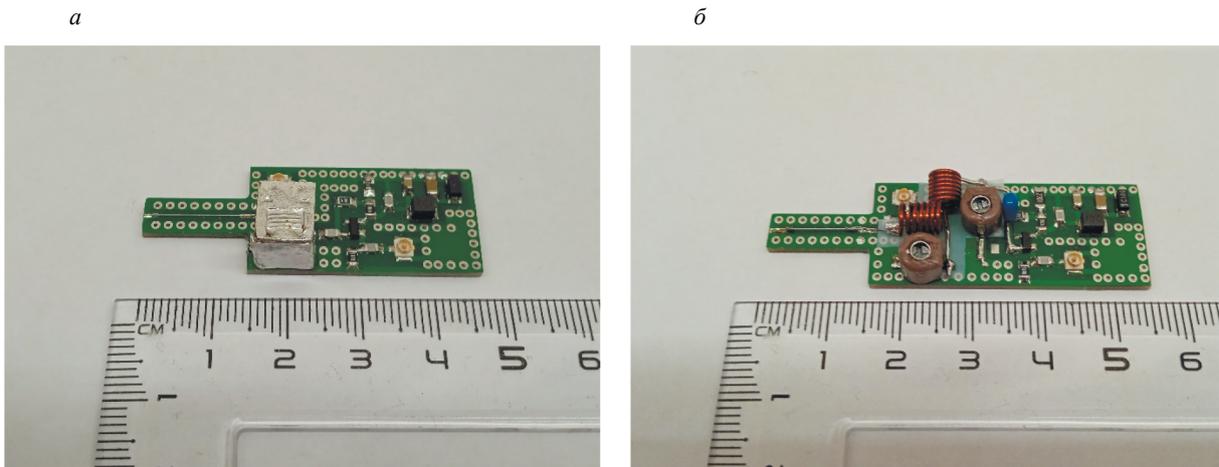


Рис. 5. Плата датчика с одноконтурной (а) и двухконтурной (б) входными цепями. Катушка подмагничивания (не показана) надевается на выступ платы с чувствительным элементом (слева).

На высоких частотах чувствительность датчика может быть увеличена за счет включения магнитоимпеданного чувствительного элемента Z в LC-контур. Параметры контура подбираются таким образом, чтобы при малых изменениях сопротивления элемента происходило значительное изменение добротности и, соответственно, коэффициента передачи контура. Колебательный контур должен также ослаблять влияние промышленных помех и радиовещательных станций на результаты измерений. Различные варианты включения магнитоимпеданного элемента в колебательный контур рассмотрены на рис. 6—8.

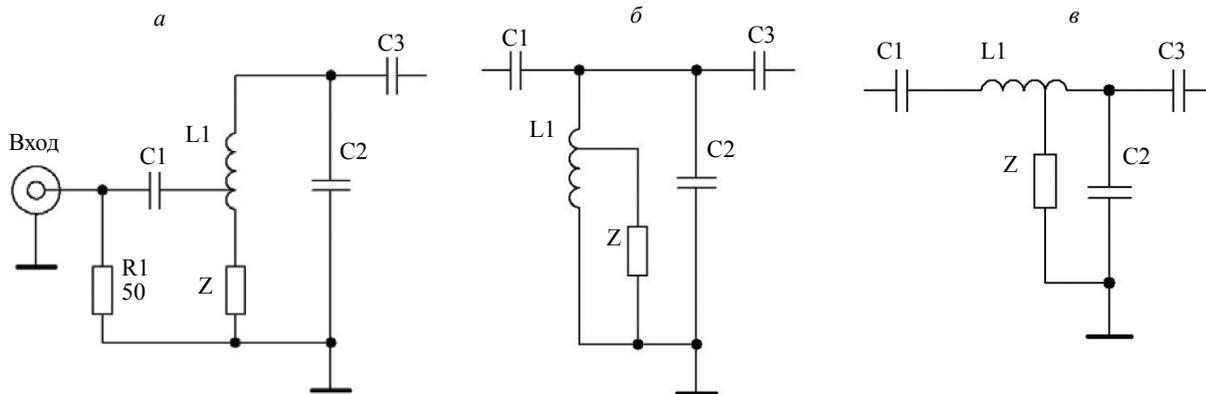


Рис. 6. Включение чувствительного элемента в LC-контур (а—в).

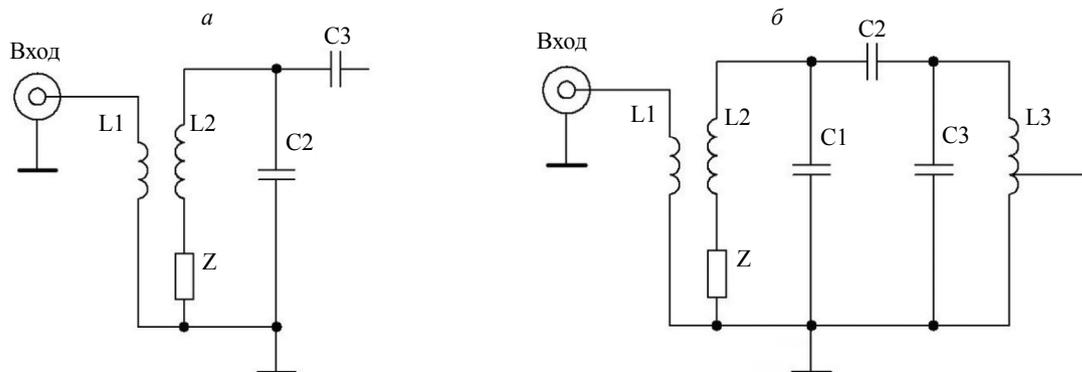


Рис. 7. Схема с индуктивной связью на входе (а); двухконтурная входная цепь (б).

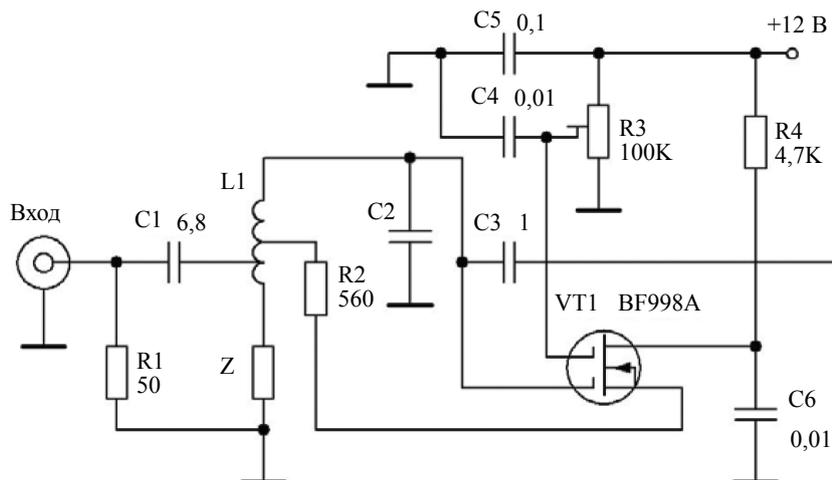


Рис. 8. Схема включения чувствительного элемента в колебательный контур с умножением добротности.

Номиналы элементов резонансных контуров (см. рис. 6—8) определены из условия максимума чувствительности по внешнему магнитному полю $\frac{d|K|}{dH}$ на частоте 75 МГц и согласования входных и выходных сопротивлений, где $|K| = \sqrt{(\text{Re}K)^2 + (\text{Im}K)^2}$ — модуль коэффициента передачи цепи; $\psi = \arg\left(\frac{\text{Im}K}{\text{Re}K}\right)$ — аргумент коэффициента передачи цепи; H — напряженность внешнего магнитного поля. Например, коэффициент передачи цепи для контура рис. 6а:

$$K = \frac{Z_{16}}{R_g + Z_{16}} \cdot \frac{j\omega C_1 Z_{26}}{1 + \omega^2 C_1 M + j\omega C_1 Z_{26}} \cdot Z_{36}, \tag{1}$$

где

$$Z_{16} = \frac{R_1 \cdot (1 + \omega^2 C_1 M)}{j\omega R_1 C_1 + 1 + \omega^2 C_1 M}; \tag{2}$$

$$Z_{26} = \frac{(j\omega(L_2 + M) + Z) \cdot (j\omega(L_2 + M) + Z_{46})}{j\omega(L_1 + L_2 + 2M) + Z + Z_{46}}; \tag{3}$$

$$Z_{36} = \frac{1 + j\omega C_3 R_L}{j\omega(L_1 + M) \cdot (j\omega(C_2 + C_3) - \omega^2 C_2 C_3 R_L) + 1 + j\omega C_3 R_L}; \tag{4}$$

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 L_2} \tag{5}$$

— взаимная индуктивность верхней (L1) и нижней (L2) по схеме частей катушки L1; k — коэффициент связи; Z — импеданс чувствительного элемента; R_g, R_L — сопротивление генератора и нагрузки соответственно.

Для всех схем включения чувствительного элемента, представленных на рис. 6—8, проведено моделирование в программе Micro-Cap 12 [12] и проверена работа узлов на печатных платах (см. рис. 5). С помощью анализатора спектра DSA815-TG измерены амплитудно-частотные характеристики и фазочастотные характеристики контуров. На основе полученных в результате измерений АЧХ рассчитаны такие параметры датчика, как максимальное изменение коэффициента передачи от напряженности внешнего магнитного поля $\left(\frac{\partial|K|}{\partial H}\right)_{\max}$ (максимальная чувствительность), напряженность поля подмагничивания и ширина полосы пропускания по уровню –3 дБ в области максимального изменения коэффициента передачи (табл. 1). На основе ФЧХ рассчитаны максимальные чувствительности измеряемых цепей по фазе сигнала $\left(\frac{\partial\psi}{\partial H}\right)_{\max}$ (см. табл. 1).

Семейство амплитудно-частотных характеристик при изменении поля подмагничивания для схемы с последовательным включением чувствительного элемента (см. рис. 6а) представлено на рис. 9а. Соответствующее семейство фазочастотных характеристик представлено на рис. 9б.

В табл. 1 представлены основные параметры резонансных контуров с чувствительным элементом Z , которые возможно использовать для повышения чувствительности датчика.

Сравнение различных схем включения чувствительного элемента во входную цепь показывает, что наилучшими параметрами обладает схема с умножением добротности (см. рис. 8). Несмотря на то, что пассивные схемы (см. рис. 6б, в) характеризуются значительным изменением коэффициента передачи от внешнего магнитного поля (109 %/Э и 188 %/Э), достигается это за счет неоправданно большой ширины полосы пропускания (11,4 МГц и 9,2 МГц). Двухконтурные входные цепи позволяют сузить полосу пропускания, но усложняют настройку, снижают общий коэффициент передачи, увеличивают габариты датчика. Пример одной из возможных двухконтурных цепей

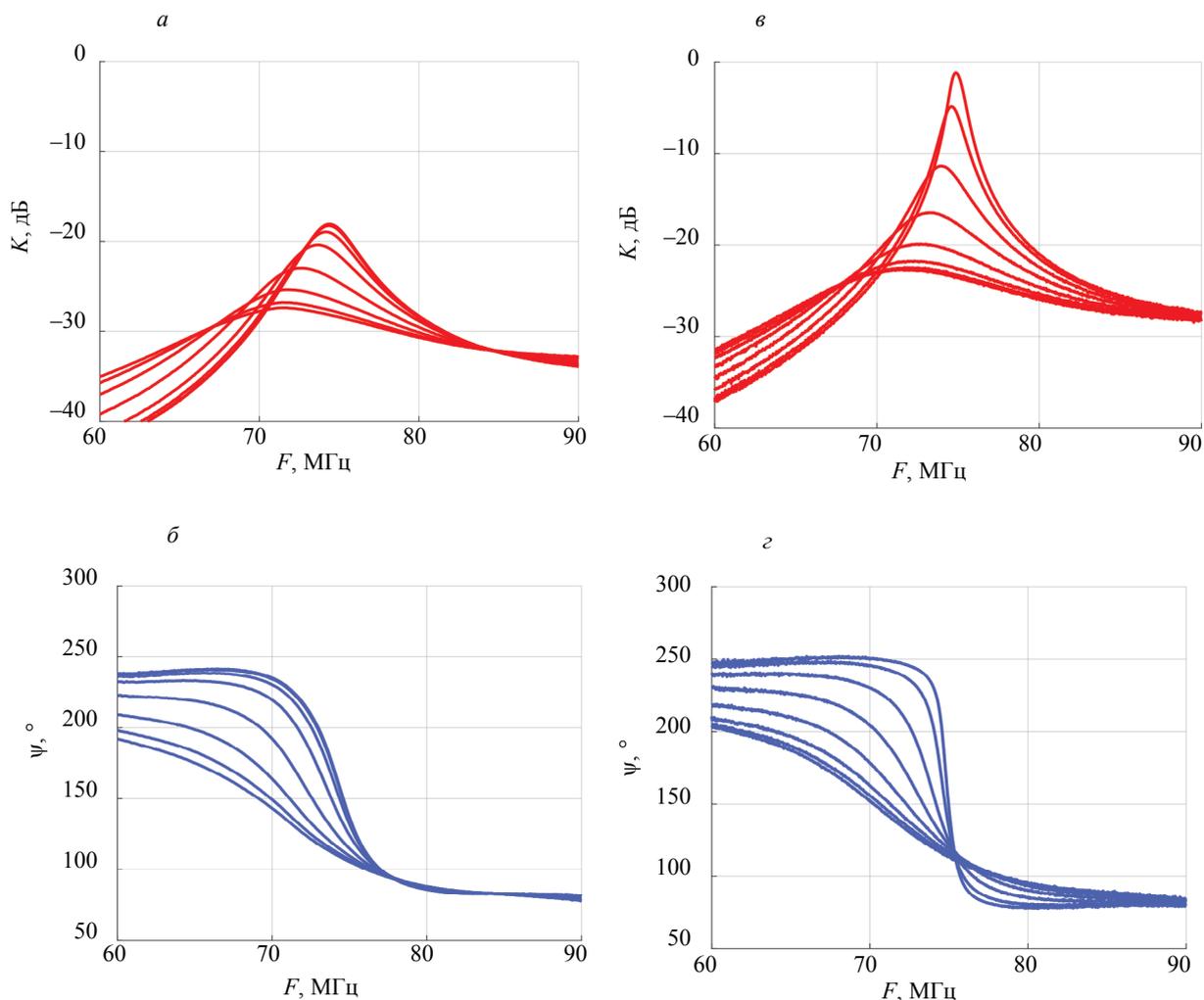


Рис. 9. АЧХ и ФЧХ-цепи с последовательным включением чувствительного элемента в контур (а, б) и цепи с умножением добротности (в, г).

Таблица 1

Схема	Коэффициент передачи ¹	Макс. чувствительность $\frac{d K }{dH}$ (75 МГц)	Поле подмагничивания	Ширина полосы пропускания ²	Макс. чувствительность $\frac{d\psi}{dH}$ (75 МГц)
Z в линии 50 Ом	-16,2 дБ	2,3 дБ/Э 31 %/Э	3,8 Э	—	9 °/Э (75 МГц)
Рис. 6а	-23,2 дБ	3,2 дБ/Э 45 %/Э	3,6 Э	5,6 МГц	33 °/Э (72 МГц)
Рис. 6б	-25,7 дБ	6,4 дБ/Э 109 %/Э	2,6 Э	11,4 МГц	64 °/Э (67 МГц)
Рис. 6в	-34 дБ	9,2 дБ/Э 188 %/Э	2,8 Э	9,2 МГц	48 °/Э (70 МГц)
Рис. 8	-9,4 дБ	7,3 дБ/Э 132 %/Э	1,5 Э	2,5 МГц	48 °/Э (74 МГц)

¹Коэффициент передачи в области максимальной чувствительности (75 МГц).

²Ширина полосы пропускания по уровню -3 дБ в области макс. чувствительности (75 МГц).

представлен на рис. 7б. На рис. 7а показано, что вместо частичного включения возможно применение индуктивной трансформаторной связи, что позволяет упростить настройку входной цепи, но ведет к усложнению конструкции и образованию высокочастотных паразитных контуров. Трансформаторная связь также может быть полезной, если необходимо развязать гальванически генератор сигналов и детектор [13].

Пассивные цепи (см. рис. 6, 7) не требуют дополнительного источника питания, обладают минимальными собственными шумами, но могут значительно ослабить входной сигнал. Тем не менее схема с умножением добротности (см. рис. 8) при сопоставимой со схемами (см. рис. 6б, в) чувствительностью (132 %/Э) обладает минимальной из всех испытанных шириной полосы пропускания (2,5 МГц) и максимальным коэффициентом передачи (-9,4 дБ). АЧХ и ФЧХ резонансной цепи с датчиком представлены на рис. 9в и г соответственно.

Немаловажным является и тот факт, что максимальное изменение фазы в схеме с умножением добротности наблюдается на частоте, близкой к 75 МГц, что позволяет выбрать режим в квадратурном демодуляторе с одновременным мониторингом амплитуды и фазы сигнала. Достоинством применения данной схемы является также возможность значительного снижения напряженности постоянного поля подмагничивания ($H = 1,5$ Э), к чему стремятся многие разработчики магнитоимпедансных датчиков [14], поскольку при меньшем поле подмагничивания меньше нагрев катушки и меньше влияние шумов источника постоянного тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ДАТЧИКА С КВАДРАТУРНЫМ ДЕМОДУЛЯТОРОМ СИГНАЛА

Датчик слабых магнитных полей с умножителем добротности испытан в составе детектора на основе квадратурного демодулятора сигнала. Структурная схема детектора представлена на рис. 10.

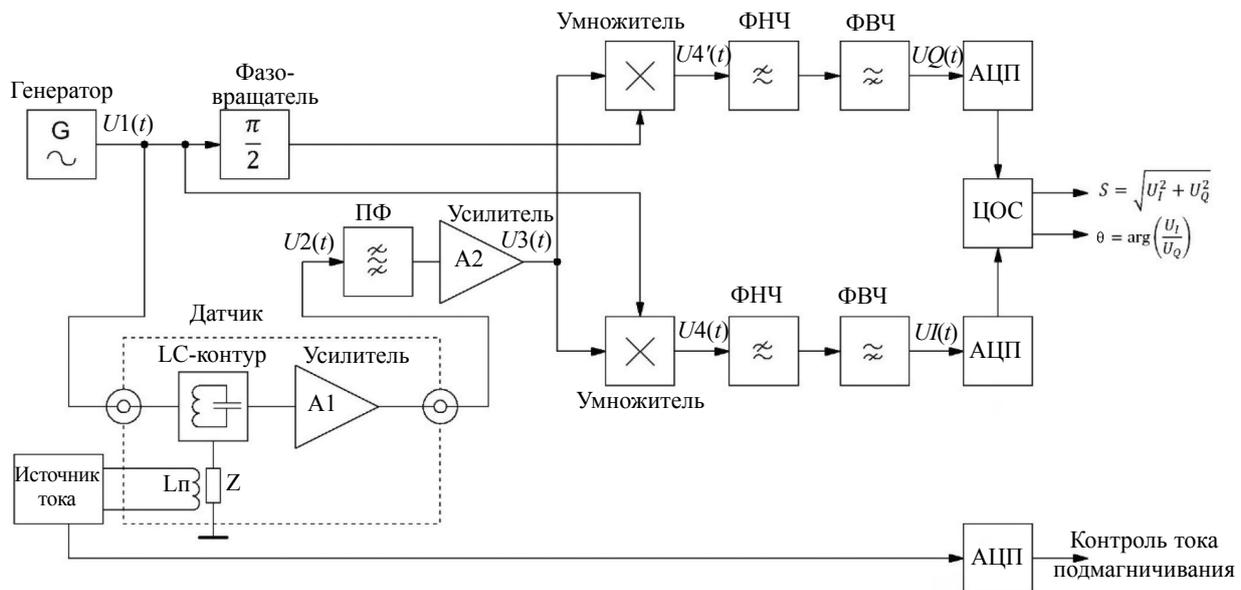


Рис. 10. Структурная схема детектора на основе квадратурного демодулятора сигнала.

В корпусе датчика кроме чувствительного элемента собран также предварительный усилитель на малошумящем двухзатворном КМОП-транзисторе BF998А, что позволило значительно снизить наводки на коаксиальный кабель от радиостанций УКВ диапазона. Предварительный усилитель также необходим для согласования импеданса LC-контура (см. рис. 10) с волновым сопротивлением кабеля и входным сопротивлением 50 Ом полосового фильтра FTR-3874. Полосовой фильтр (ПФ) с резонансным усилителем (А2) обеспечивают выделение полезного сигнала частотой 75 МГц за счет сужения полосы пропускания тракта до 30 кГц (по уровню -3 дБ).

Далее в квадратурном демодуляторе полезный сигнал перемножается в умножителях, выполненных на AD831, с опорным сигналом и смещенным по фазе на 90° опорным сигналом. Фильтры низких частот (ФНЧ) с частотой среза 2,5 кГц не пропускают на вход АЦП высокочастотные про-

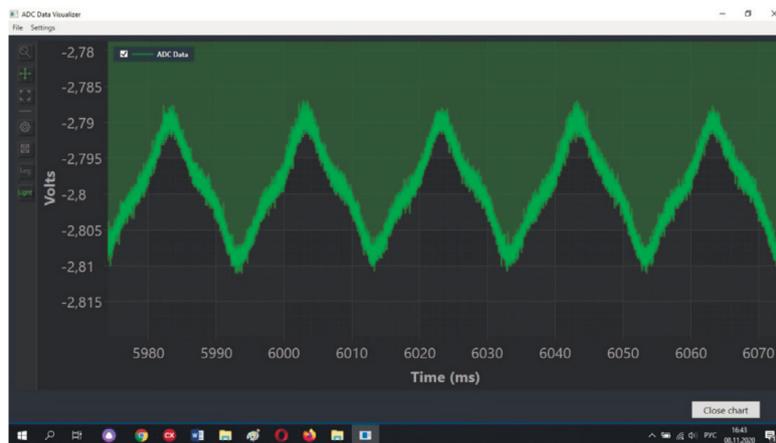


Рис. 11. Окно программы в режиме просмотра полученных данных.

дукты перемножения. Фильтры высоких частот (ФВЧ) с частотой среза 0,1 Гц предназначены для ограничения регистрации медленных флуктуаций магнитного поля, влияющих на смещение нулевого уровня высокочувствительного детектора. Синфазный и квадратурный сигналы преобразуются в цифровой вид в четырехканальном 14-бит АЦП E20-10 [15], работающем с частотой дискретизации 250 кГц. На один из каналов АЦП подается также сигнал с источника тока (см. рис. 10) для контроля тока подмагничивания чувствительного элемента. Цифровые сигналы считываются с АЦП программой, работающей под управлением ОС Windows 10. Программа обладает удобным интерфейсом, позволяющим оператору наблюдать за изменением магнитного поля в режиме реального времени, записывать результаты работы детектора на жесткий диск ноутбука, а также просматривать записанные файлы [16]. В режиме просмотра программа позволяет оператору масштабировать полученные графики по осям X и Y , выделять зону интереса, находить значения полученных данных в определенных точках (рис. 11). Программа позволяет производить с полученными данными такие функции цифровой обработки сигналов, как вычисление амплитуды и фазы сигнала, определение скользящего среднего, вычисление быстрого преобразования Фурье.

УРОВЕНЬ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ФИКСИРУЕМЫЙ ДАТЧИКОМ

Для калибровки и оценки чувствительности детектора слабых магнитных полей датчик помещен в систему компенсации магнитного поля Земли (рис. 12). Кроме того, пара катушек Гельмгольца подключена к выходу генератора DG-3121 для создания калибровочного переменного магнитного поля частотой от 0,01 Гц до 2,5 кГц. Сигнал снимается с нагрузочного сопротивления $R2$, равного 50 Ом (см. рис. 12).

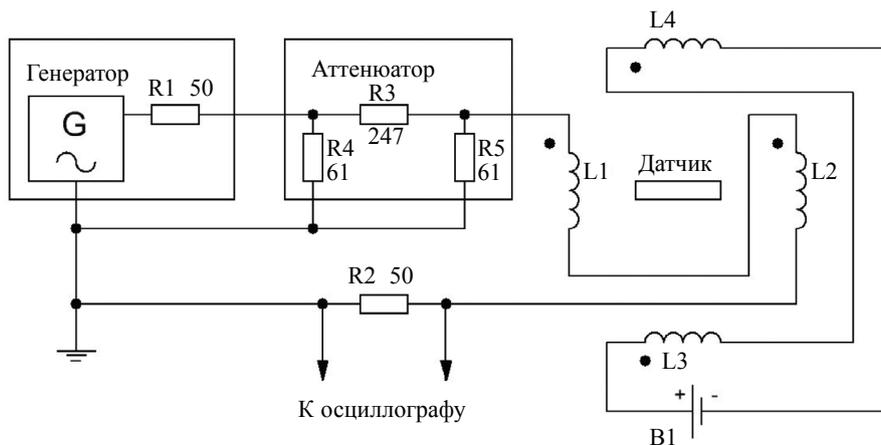


Рис. 12. Схема установки для калибровки детектора слабых магнитных полей.

Для калибровки детектора генератор DG-3121 формирует прямоугольные импульсы амплитудой от 9,99 В до 10 мВ. Прямоугольные импульсы амплитудой 1 мВ формируются с использованием аттенуатора (20 дБ, 50 Ом). Амплитудное значение силы тока в катушках Гельмгольца L1L2 измерено за счет падения напряжения на нагрузочном сопротивлении R2 с помощью осциллографа Tektronix TDS-1021 (см. рис. 12). При амплитуде прямоугольных импульсов 9,99 В амплитуда силы тока составила $I_m = 98$ мА. Собственное сопротивление $R = 1,9$ Ом и индуктивность $L = 2,3$ мГн катушек L1L2 вносят незначительную погрешность на низких частотах. Соответственно, амплитуда напряженности магнитного поля в центре между катушками L1L2:

$$H_m = 0,716 \cdot \frac{I_m \cdot N}{r} = 7,7 \frac{\text{А}}{\text{м}}, \quad (6)$$

где $N = 27$ — число витков в катушке; $r = 245$ мм — радиус катушек Гельмгольца.

Для определения начальной точки калибровки использован миллитесламетр ТПУ 28134-04. При амплитуде прямоугольных импульсов 9,99 В амплитуда измеренной индукции была на уровне $B_m = \mu_0 H_m = 9,7$ мкТл.

Это позволило определить верхнюю точку калибровочной прямой, а далее пользоваться формулой (6) для определения чувствительности детектора в широком динамическом диапазоне, составляющем более 80 дБ.

Для снижения влияния шумов и промышленных помех после умножителей включены ФНЧ и ФВЧ, ограничивающие ширину полосы входного сигнала АЦП. Благодаря этому полоса пропускания детектора магнитного поля по уровню -3 дБ составляет диапазон от 0,5 Гц до 1 кГц (рис. 13).

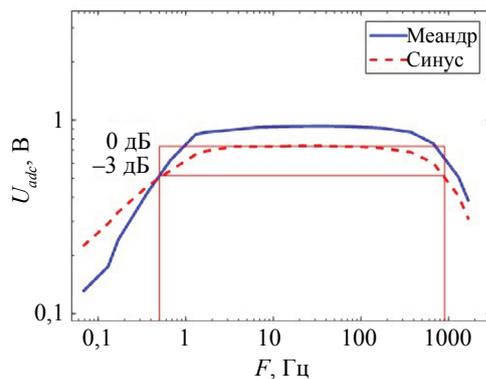


Рис. 13. Диапазон частот работы детектора при синусоидальном и близком к прямоугольному изменению магнитного поля с максимальной индукцией $B_m = 100$ нТл.

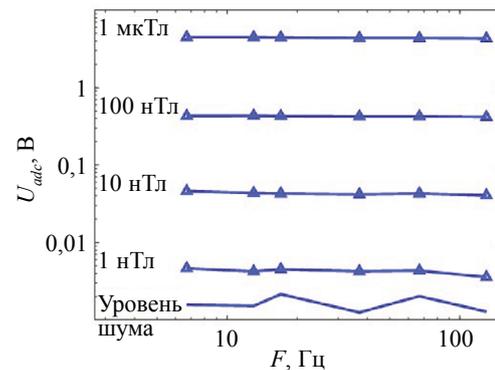


Рис. 14. Регистрируемая детектором амплитуда первой гармоники сигнала при различных уровнях индукции внешнего магнитного поля.

Показания детектора линейны в частотном диапазоне от единиц до ста герц в области изменений внешнего магнитного поля от 1 нТл до 1 мкТл (рис. 14). Значения уровня белого шума на графике более чем на 10 дБ ниже величины сигнала на входе АЦП, при которой регистрируется сигнал амплитудой 1 нТл. Пример регистрации детектором прямоугольных импульсов магнитного поля частотой 13 Гц после цифрового подавления частот, кратных 50 Гц, представлен на рис. 15.

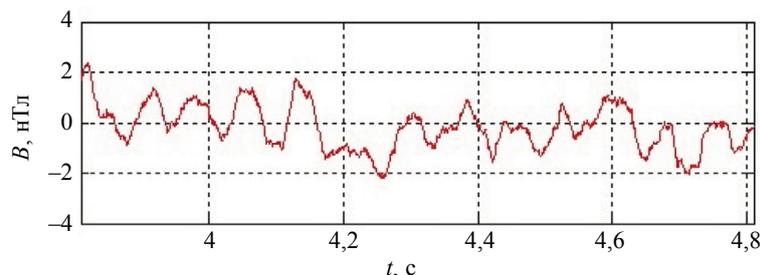


Рис. 15. Регистрация детектором прямоугольных импульсов магнитного поля амплитудой 1 нТл и частотой 13 Гц.

Достигнутая чувствительность слабых переменных магнитных полей амплитудой 1 нТл при комнатной температуре и в условиях промышленных электромагнитных помех сопоставима с чувствительностью лучших мировых аналогов [17] и чувствительностью датчиков на основе феррозондов в области инфранизких частот [18]. Кроме того, предлагаемая методика позволяет увеличить чувствительность быстродействующих датчиков, поскольку рассчитана на работу в области частот десятки-сотни мегагерц [19]. При применении квадратурной демодуляции сигнала быстродействие датчика ограничено шириной полосы пропускания полосового фильтра (ПФ) и может достигать десятков микросекунд. Очевидно, что шумы датчика могут быть уменьшены за счет снижения температуры чувствительного элемента и за счет проведения исследований в специальном экранированном помещении, что увеличит достоинства предложенного метода.

ВЫВОДЫ

1) Предложенный метод включения чувствительного магнитоимпедансного элемента на основе проволоки с электроосажденным пермаллоем в колебательный контур с умножением добротности позволяет повысить чувствительность датчика магнитного поля (от 31 %/Э до 132 %/Э) при работе на частоте 75 МГц.

2) Включение чувствительного элемента в контур с умножением добротности сопровождается сужением полосы входного сигнала до 2,5 МГц, и, в результате, на порядок возрастает отношение сигнал/шум датчика.

3) Описанный тип включения магнитоимпедансного датчика позволяет снизить напряженность постоянного магнитного поля смещения с 3,9 Э до 1,5 Э, что значительно упрощает систему подмагничивания и снижает влияние шумов источника тока.

4) Разработанный резонансный датчик в составе квадратурного демодулятора сигнала позволяет различать изменения магнитного поля на уровне 1 нТл при отношении сигнал/шум 10 дБ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-48-660044.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Датчики / Справочное пособие. Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. М.: Техносфера, 2012. 624 с.
2. Балбашов А.М., Червоненкис А.Я. Магнитные материалы для микроэлектроники. М.: Энергия, 1979. 216 с.
3. Vazquez M. Giant magneto-impedance in soft magnetic wires // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2001. V. 226. P. 693—699.
4. Курляндская Г.В., Волчков С.О., де Кос Д. Магниточувствительные преобразователи для неразрушающего контроля, работающие на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта (Обзор) // Дефектоскопия. 2009. № 6. С. 13—42.
5. Сысоева С. Датчики магнитного поля. Ключевые технологии и новые перспективы. Часть 3. XMR (АМР/ГМР/ТМР) — конкуренты датчиков Холла // Компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 49—62.
6. Маргелов А. Модульные и компонентные магниторезистивные датчики и компасы Honeywell // Новости электроники. 2006. Т. 10. С.10—14.
7. Shcherbinin S.V., Volchkov S.O., Chlenova A.A., Kurlyandskaya G.V. Load Matching for Giant Magnetoimpedance Sensor in Coaxial Configuration // Key Engineering Materials. 2019. V. 826. P. 19—24.
8. Le Anh-Tuan, Phan Manh-Huong. Advanced Magnetic Microwires as Sensing Elements for LC-resonant-type Magnetoimpedance Sensor: a Comprehensive Review // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2012. V. 25. P. 181—195.
9. Nie Xinhua, Pan Zhongming. Differential-type Integrating GMI Magnetic Sensor Based on Orthogonal Vector Lock-in Amplifier / 2013 Chinese Automation Congress. Publisher: IEEE. Changsha, China. P. 344—347. DOI: 10.1109/CAC.2013.6775756
10. UNIVAC 9000 Series. Facts and Figures. 1969. Sperry Rand Corporation.
11. Beach R.S., Smith N., Platt C.L., Jeffers F., Berkowitz A.E. Magneto-impedance effect in NiFe plated wire // Applied Physics Letters. 1996. V. 68. P. 2753.
12. www.spectrum-soft.com
13. Горшелев В.Д., Красноцветова З.Г., Федорцов Б.Ф. Основы проектирования радиоприемников. Л.: Энергия, 1977. 384 с.
14. Atalay S., Izgi T., Buznikov N.A., Kolat V.S. Asymmetric giant magnetoimpedance effect created by micro magnets // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. V. 453. P.163—167.

15. E20-10. USB 2.0 модуль АЦП / Руководство пользователя. ЗАО «Л-Кард». 2008.
16. *Yarushin K.A., Shcherbinin S.V., Kurlyandskaya G.V.* DDS control and magneto-impedance sensor signal lock-in amplifier data reading program. The VII International Researches Conference — Physics, Technology, Innovations (PTI-2020) // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2313. P. 040022.
17. *Uchiyama T., Mohri K., Honkura Y., Panina L.V.* Recent advances of pico-Tesla resolution magneto-impedance sensor based on amorphous wire CMOS IC MI sensor // IEEE Transactions on Magnetism. 2012. V. 48. № 11. P. 3833—3839.
18. *Реутов Ю.Я.* Чувствительный феррозондовый магнитометр // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 18—25.
19. *Голубева Е.В., Волчков С.О., Щербинин С.В., Курляндская Г.В.* Магнитоимпедансные свойства аморфной проволоки CoFeSiB в широком частотном диапазоне: фокус на сенсорные приложения // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 42—50.
-