



Объединенный ученый совет СО РАН по физическим наукам. Доклад №8

Широкополосный магнитометр слабых магнитных полей на основе микрорезонансного резонатора с тонкой магнитной пленкой



Академик
Киренский Леонид Васильевич



Докладчик: к.ф.-м.н., зав. лаб.
Научного приборостроения ИФ СО РАН,
Боев Никита Михайлович



Академик
Шабанов Василий Филиппович

Красноярск, 12.11.2020

Лаборатория научного приборостроения Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН



- Лаборатория создана в декабре 2018 года.
- Основу созданной лаборатории составили сотрудники лаборатории Электродинамики и СВЧ-электроники ИФ СО РАН.
- В лаборатории 12 научных сотрудников.
- Средний возраст сотрудников – ~30 лет.

- Направления исследований:

- Разработка и опытное производство миниатюрных высокоизбирательных частотно-селективных устройств, фазовращателей, антенн и других СВЧ-приборов.
- Разработка и опытное производство высокочувствительных широкополосных магнитометров на основе микрополосковых резонаторов с магнитными пленками.
- Разработка новых принципов и методов измерения магнитных характеристик тонких магнитных пленок.
- Разработка и опытное производство современных приборов для проведения локальных и интегральных измерений магнитных характеристик тонких пленок.
- Проектирование, разработка и создание различных средств автоматизации физического эксперимента.



Руководитель лаборатории
Электродинамики и СВЧ-электроники,
д.т.н., профессор,
Беляев Борис Афанасьевич.



Заведующий лабораторией
Научного приборостроения ИФ СО РАН –
к.ф.-м.н., Боев Никита Михайлович.

Лаборатория научного приборостроения Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН



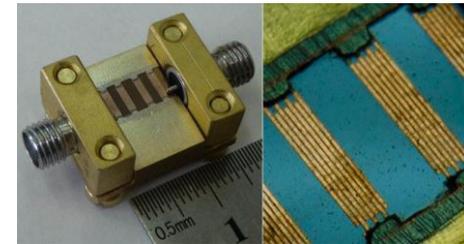
Лаборатория оснащена современным радиотехническим оборудованием:

- малошумящие линейные источники стабилизированного напряжения и тока;
- импульсные источники питания с выходной мощностью до 5 кВт;
- НЧ-генераторы сигналов произвольной формы;
- СВЧ-генераторы на частотный диапазон до 20 ГГц с выходной мощностью до 100 Вт;
- осциллографы с полосой пропускания до 6 ГГц;
- СВЧ-анализаторы спектра на частотный диапазон до 20 ГГц;
- НЧ-анализаторы спектра на частотный диапазон от 0,1 мГц;
- измерители S-параметров на частотный диапазон до 50 ГГц, зондовая станция;
- прецизионные вольтметры, амперметры, микроомметры, широкополосные анализаторы импеданса на частотный диапазон до 3 ГГц;
- оборудование для монтажа СВЧ-устройств, печатных плат.



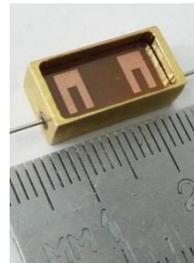
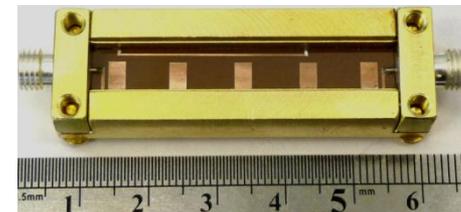
Оборудование для проведения магнитных измерений:

- экранированная комната 2x2x2 м;
- многослойные пермаллоевые магнитные экраны;
- различные системы колец Гельмгольца и катушек Фанселау, в том числе с автоматизированным вращением магнитных систем;
- тесламетры, магнитные антенны на частоты от 1 Гц до 6 ГГц;
- феррозондовый магнитометр, квантовый магнитометр на эффекте Оверхаузера.



Различное оборудование механического производства и испытательное оборудование:

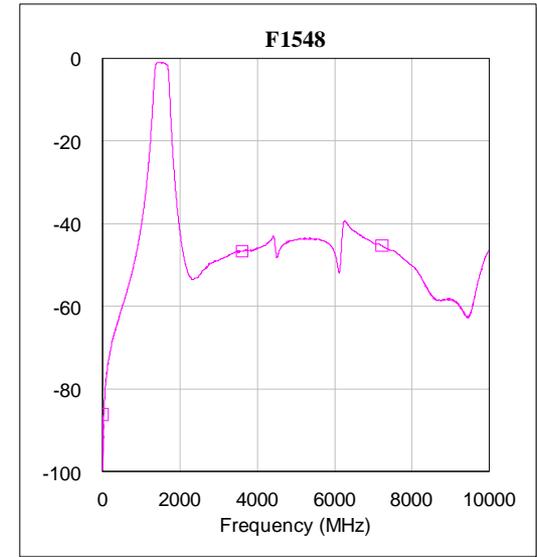
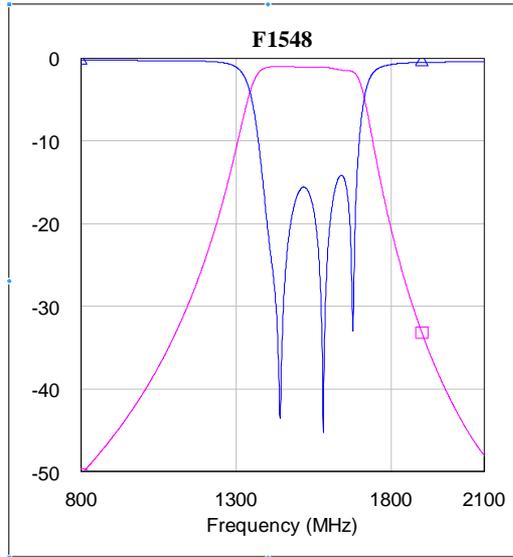
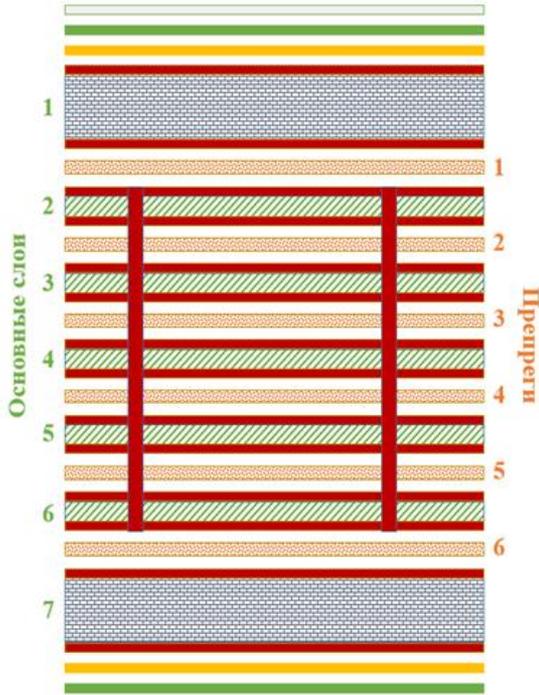
- Фрезерные, токарные станки с ЧПУ;
- маркираторы;
- станки для намотки катушек индуктивности, колец Гельмгольца, катушек Фанселау;
- климатическая камера.



Фильтры по технологии многослойных печатных плат

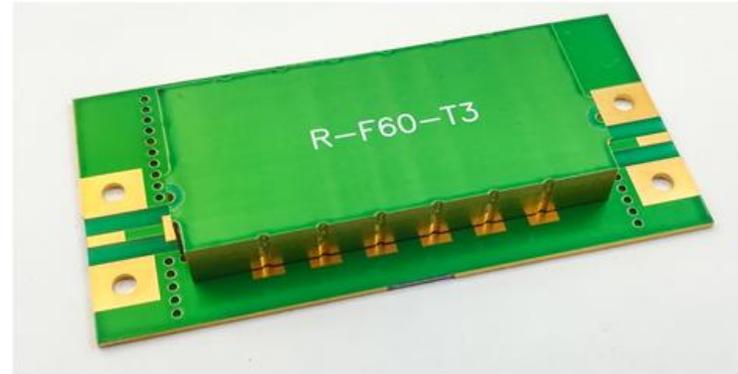
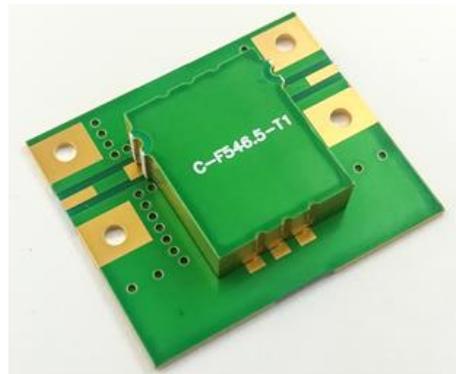
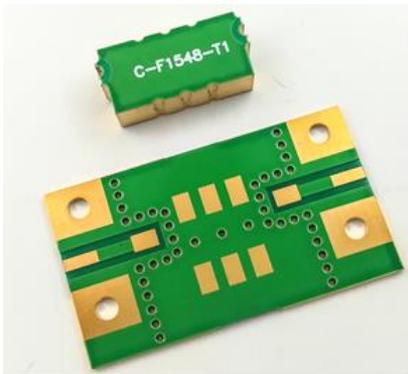


АО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«РАДИОСВЯЗЬ»



Стек печатной платы СВЧ-фильтра

АЧХ фильтра: центральная частота - 1548 МГц,
полоса по уровню 1,5 дБ - 237 МГц,
габариты 13х6,2х4,3 мм, масса 0,73 г

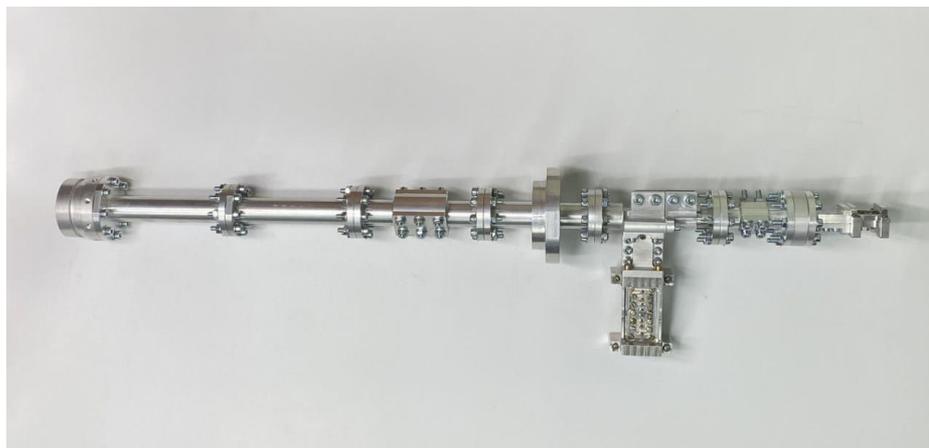


Собственное механическое производство

Токарные станки с ЧПУ

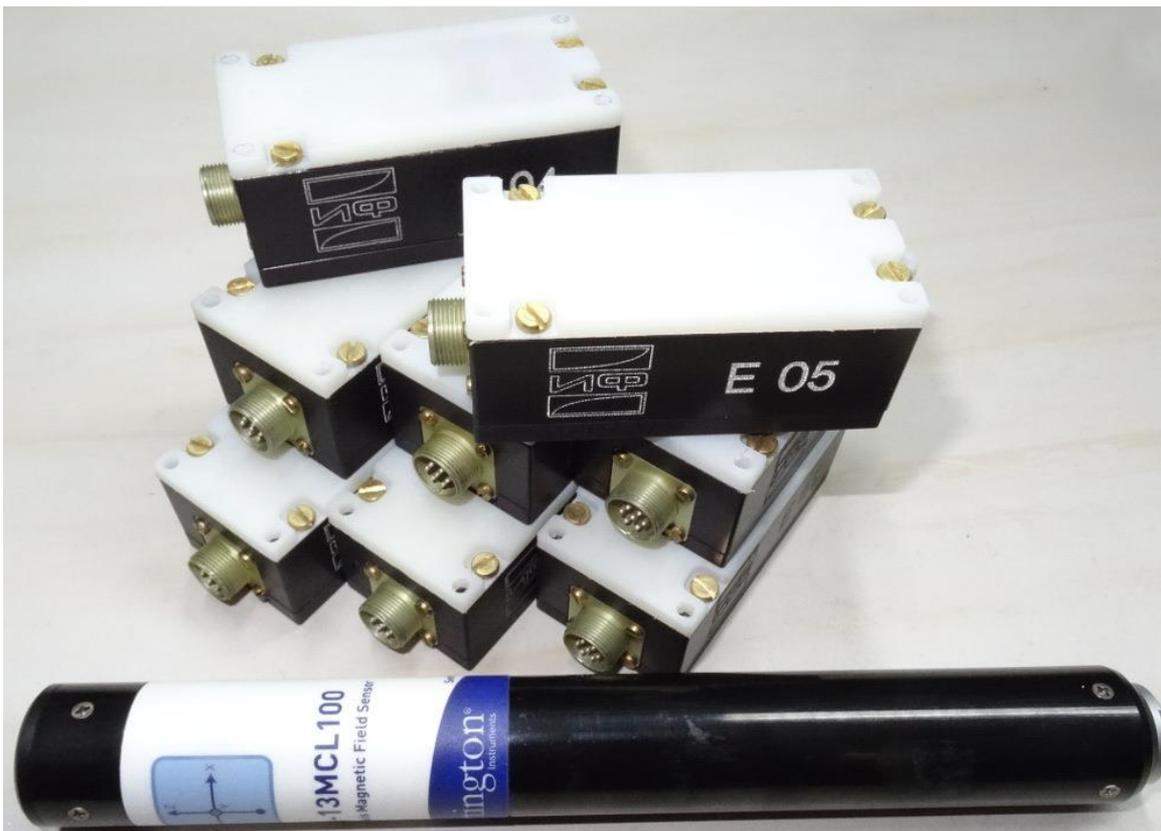


Фрезерные станки с ЧПУ



Примеры изделий: элементы волноводного тракта; облучатели; СВЧ-фильтры

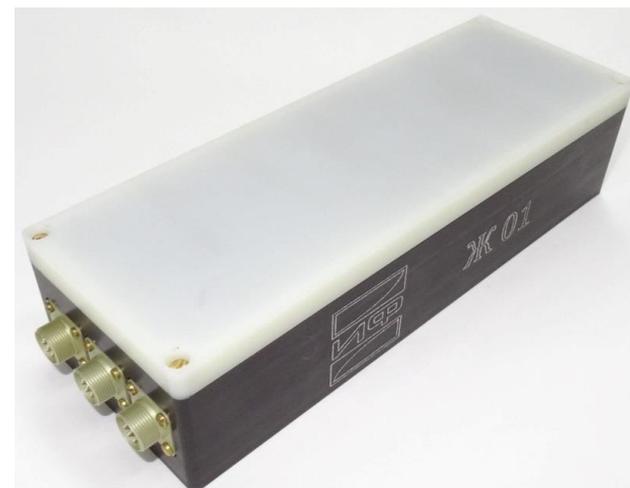
Широкополосный магнитометр слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой



Широкополосные высокочувствительные датчики слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой и английский феррозонд Bartington.



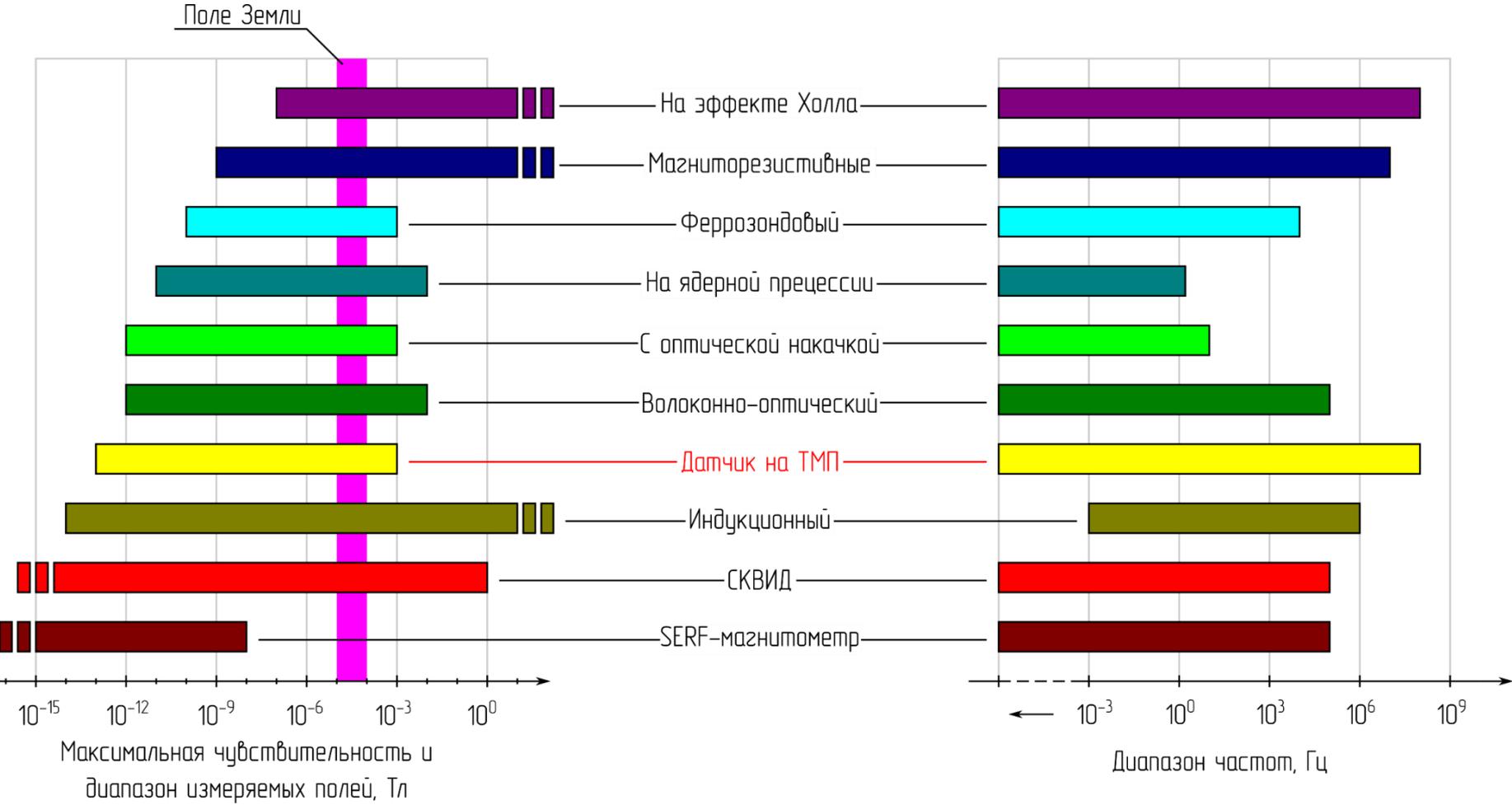
Миниатюрные тонкопленочные датчики



Магнитометр на основе разработанных датчиков

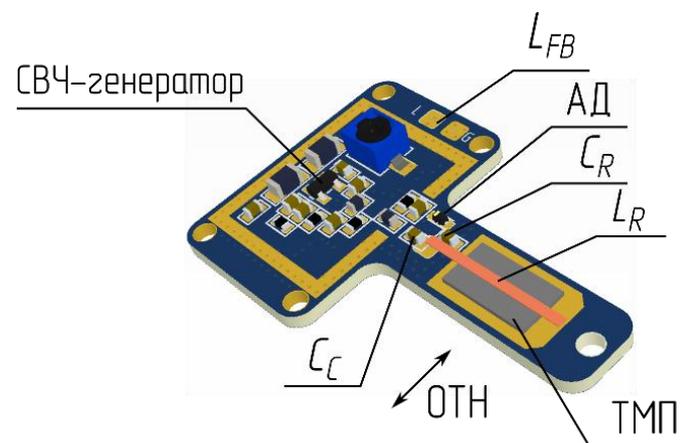
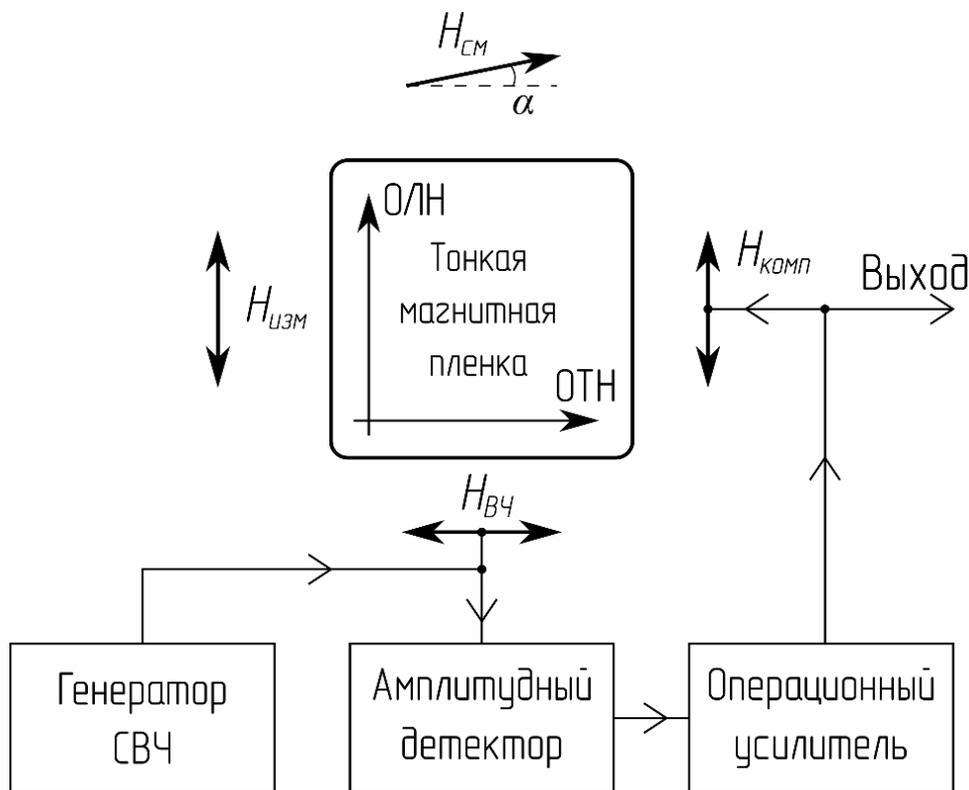


Классификация датчиков слабых магнитных полей



Максимальная чувствительность, диапазон измеряемых полей, диапазон частот современных магнитометров

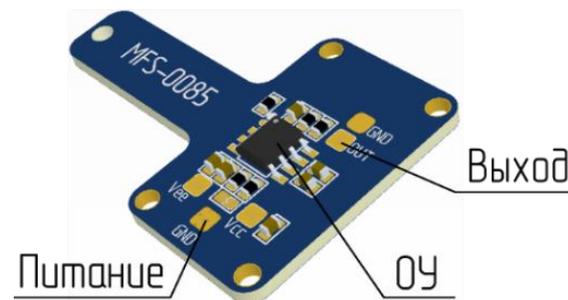
Структурная схема датчиков слабых магнитных полей. Конструкция датчиков простейшего типа



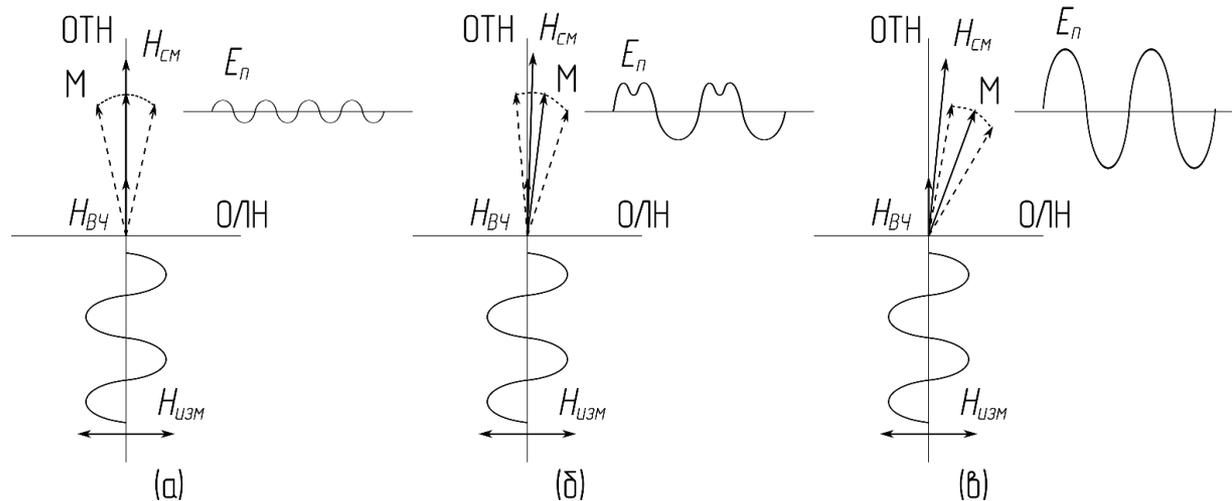
L_{FB} – к катушке обратной связи;
 $АД$ – амплитудный детектор;
 C_R, L_R – элементы СВЧ-резонатора;
 $ТМП$ – тонкая магнитная пленка $Ni_{80}Fe_{20}$;
 $ОТН$ – ось трудного намагничивания;
 $ОУ$ – операционный усилитель.

Структурная схема датчика магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с ТМП:

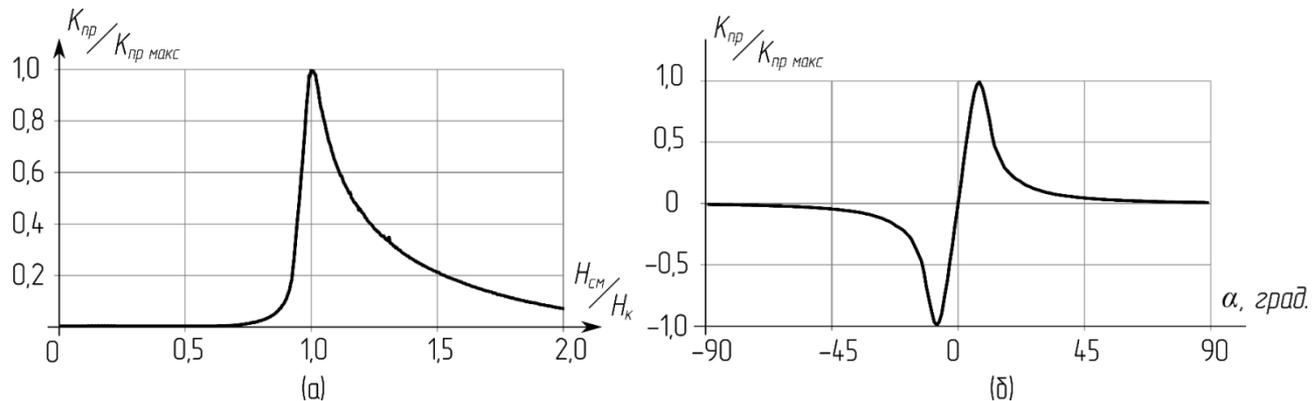
$H_{см}$ – поле смещения;
 $H_{изм}$ – измеряемое поле;
 $H_{ВЧ}$ – высокочастотное поле возбуждения;
 $H_{комп}$ – компенсационное поле



Датчики слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой

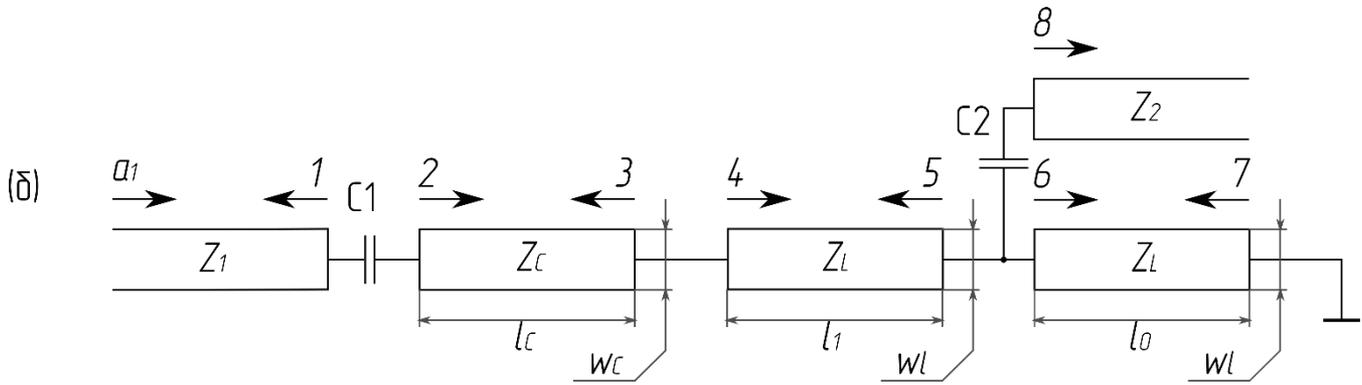
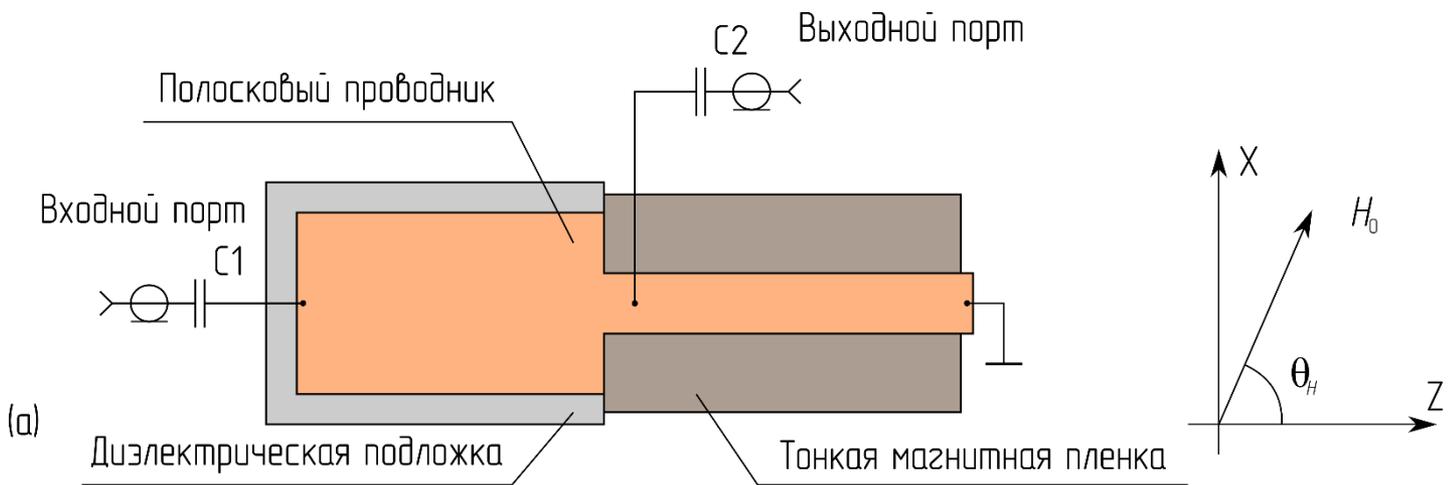


Режимы работы датчика при различных углах α между ОТН и $H_{СМ}$: а – режим удвоения частоты; б – переходный режим; в – линейный режим



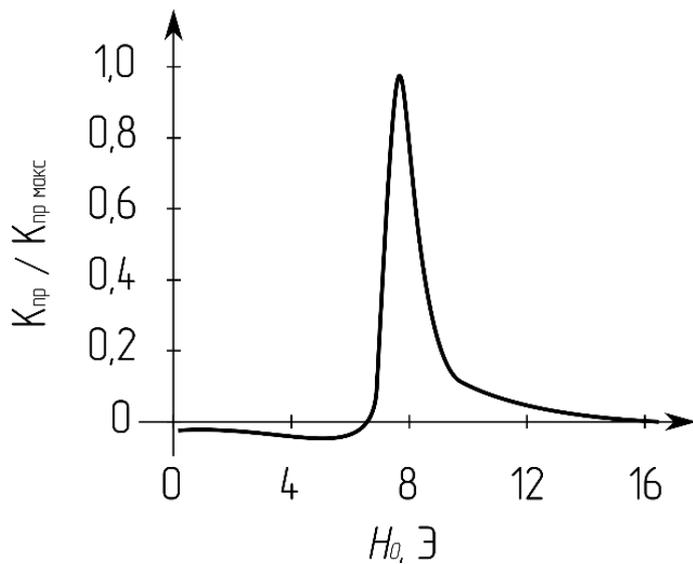
Экспериментально измеренные зависимости: а – нормированное значение коэффициента преобразования $K_{пр} / K_{пр макс}$ от нормированной величины поля смещения $H_{СМ} / H_K$; б – от угла α между полем смещения $H_{СМ}$ и ОТН

Теоретическое исследование датчика слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой

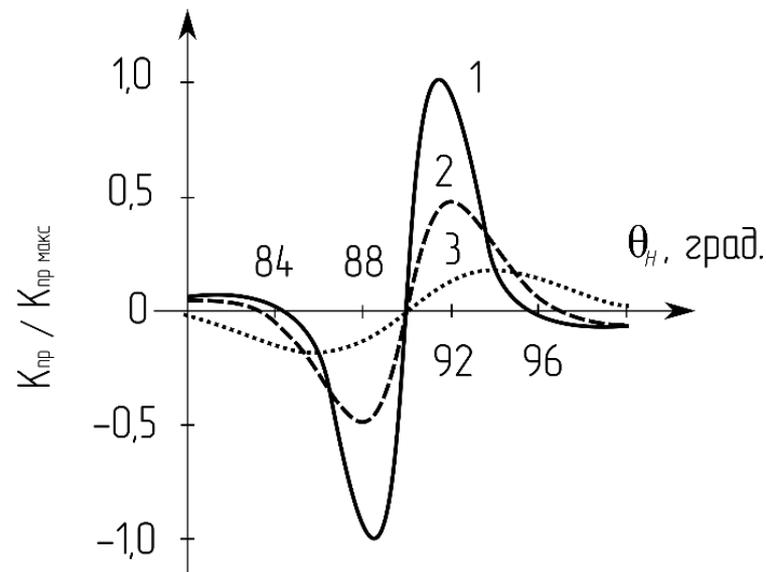


Конструкция датчика на нерегулярном четвертьволновом полосковом резонаторе с тонкой магнитной пленкой – а и его одномерная модель – б

Теоретическое исследование датчика слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой

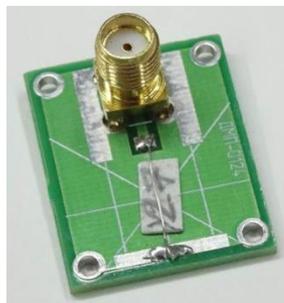
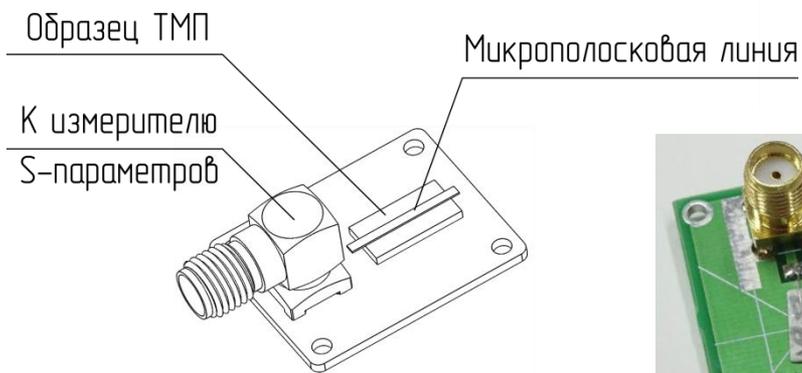
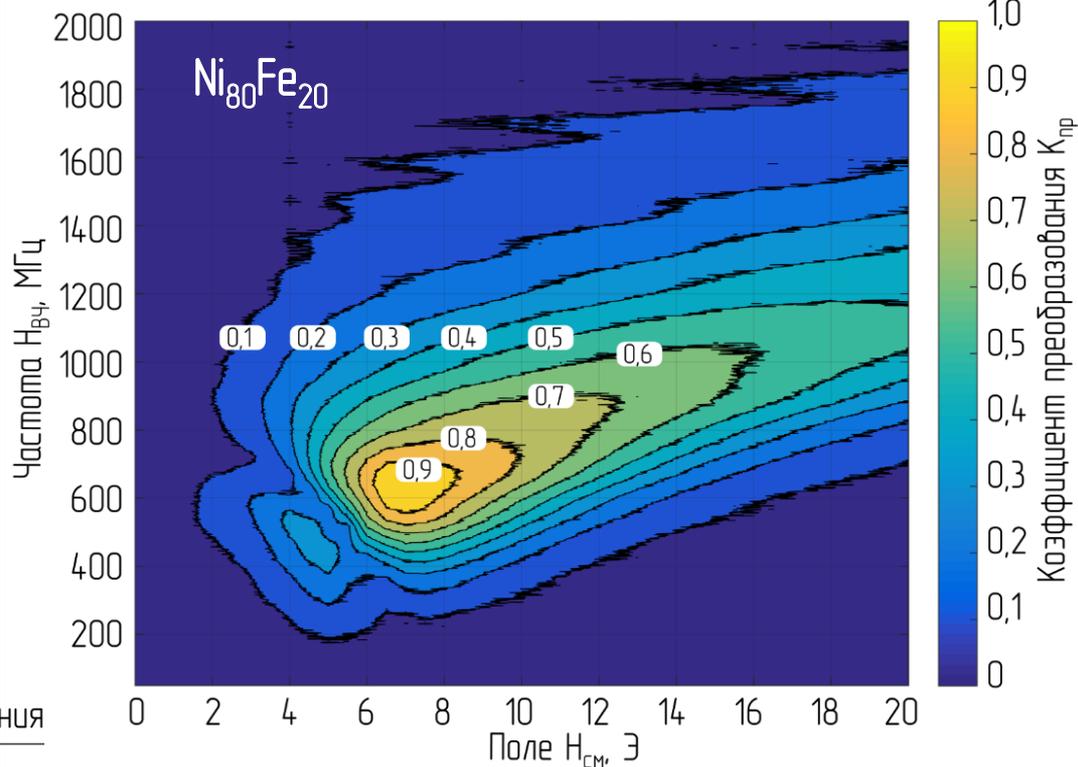
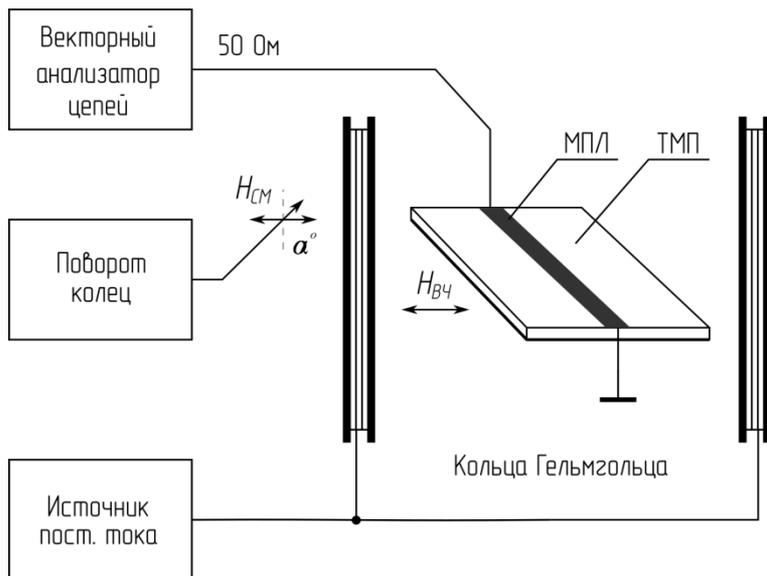


Зависимость коэффициента преобразования от величины поля подмагничивания H_0 для $\theta_H = 90,5^\circ$

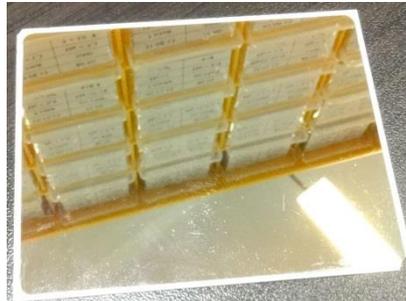
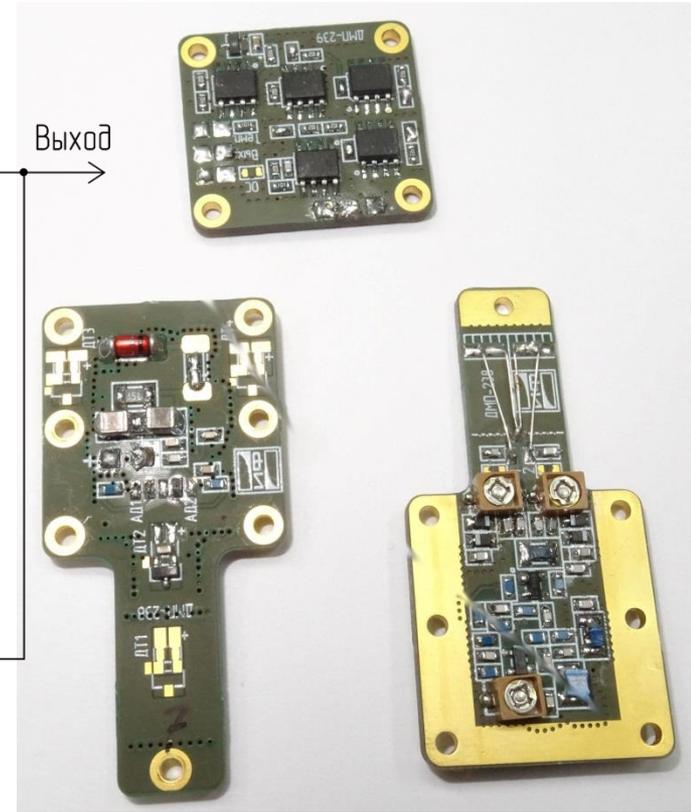
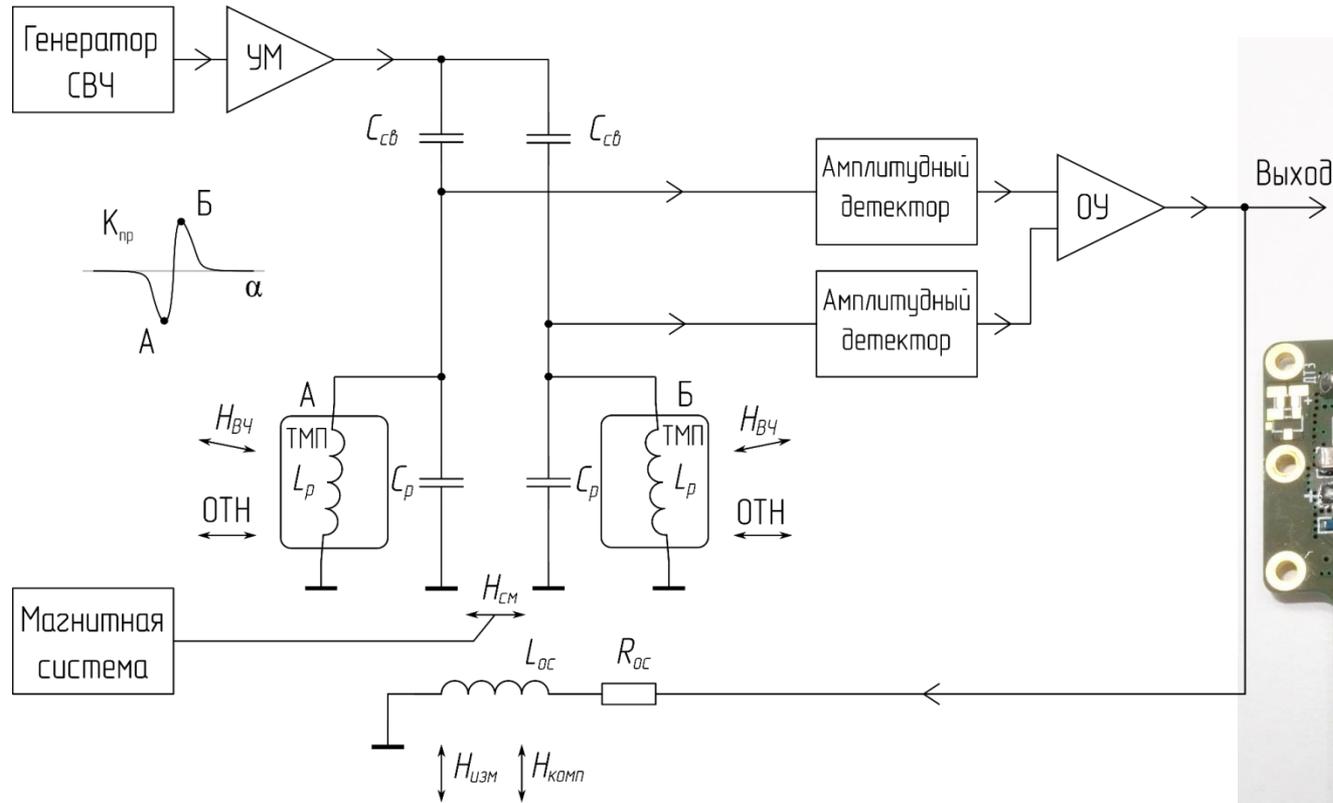


Зависимости нормированных коэффициентов преобразования датчика от угла направления поля подмагничивания, построенные при $H_0 = 10 \text{ Э}$ для различных значений угловой дисперсии одноосной магнитной анизотропии $\delta\theta_k$: 1 – $\delta\theta_k = 0^\circ$, 2 – 2° , 3 – 5°

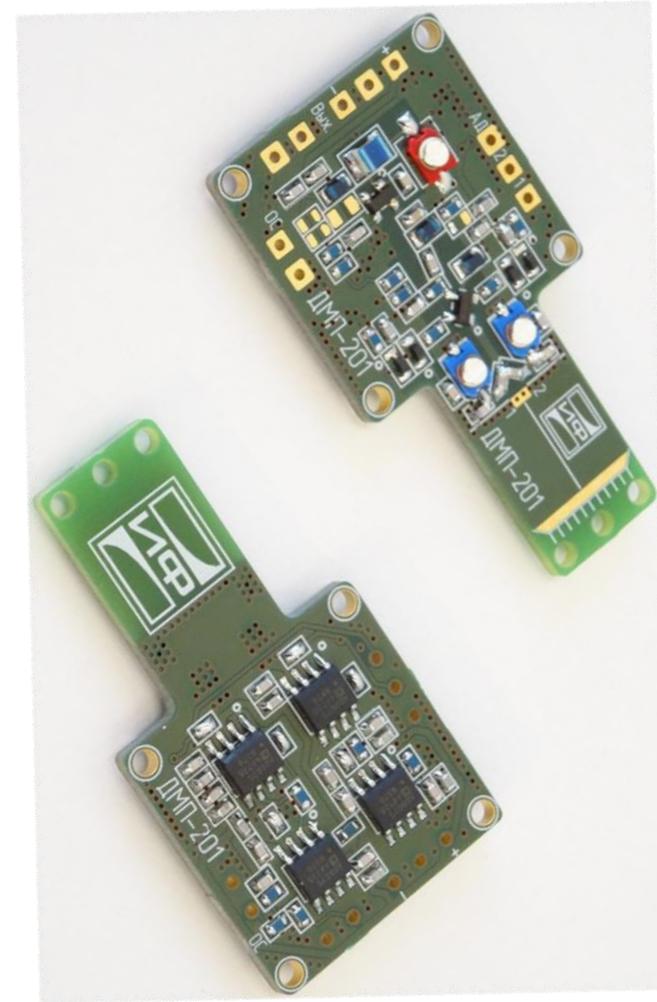
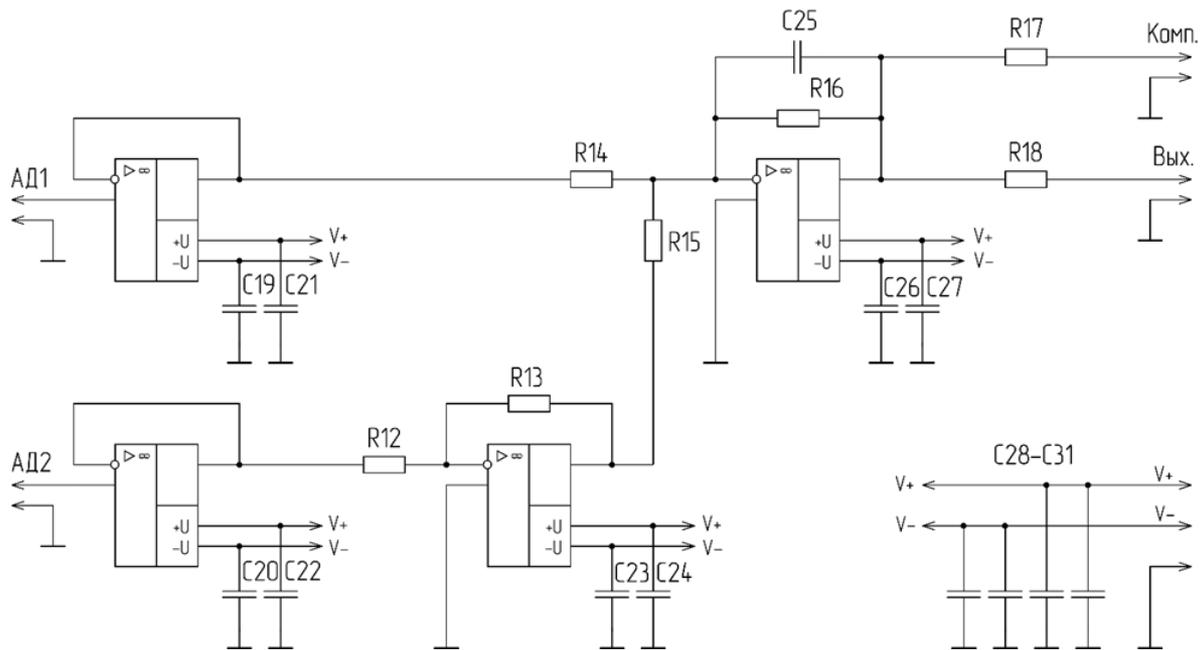
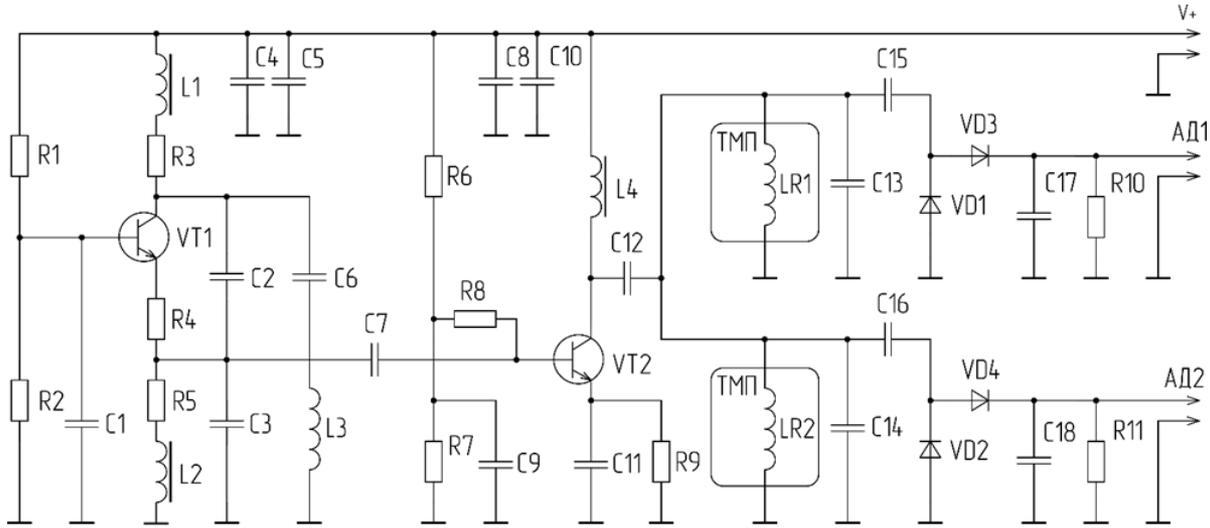
Результаты экспериментального измерения величины коэффициента преобразования чувствительного элемента от частоты поля $H_{СВЧ}$ и величины поля $H_{СМ}$



Функциональная схема датчиков слабых магнитных полей. Конструкция датчиков с двумя СВЧ-резонаторами



Электрическая принципиальная схема датчиков слабых магнитных полей

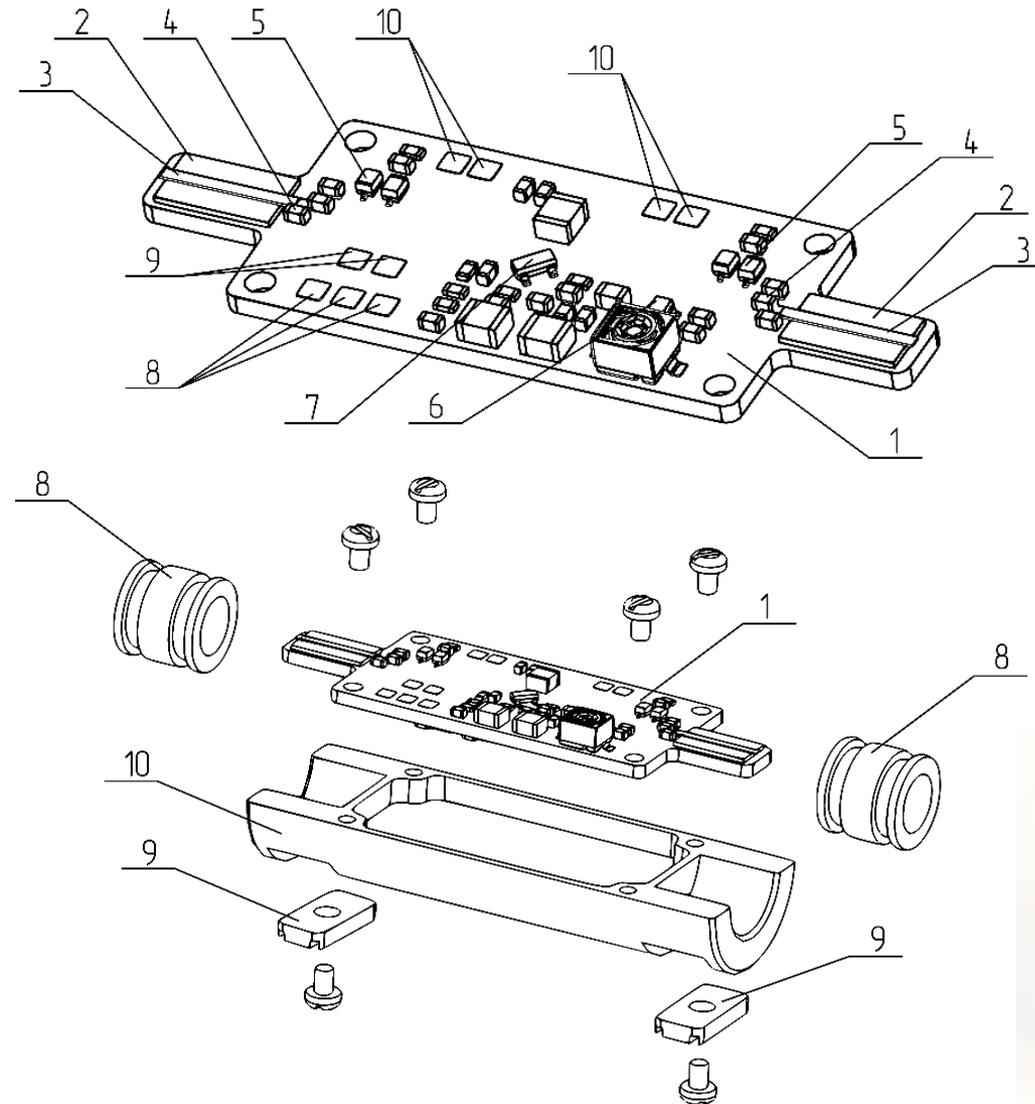


Градиентометры на основе тонких магнитных пленок



Конструкция разработанного градиентометра с одним общим СВЧ-генератором возбуждения:

- 1 – печатная плата градиентометра;
- 2 – СВЧ-генератор возбуждения;
- 3 – усилитель мощности;
- 4 – конденсатор резонатора чувствительного элемента;
- 5 – полосковая линия резонатора чувствительного элемента;
- 6 – ТМП; 7 – АД;
- 8 – кольца Гельмгольца компенсационной системы;
- 9 – магнитные системы формирования постоянного поля смещения;
- 10 – основание градиентометра.



Характеристики разработанных датчиков слабых магнитных полей



Характеристика	Феррозонд Mag-13MCL100 (трехкомпонентный)	Магнитометр на ТМП (однокомпонентный)
Диапазон полей – нижняя граница – верхняя граница	10^{-12} Тл 10^{-3} Тл	10^{-13} Тл 10^{-3} Тл
Частотный диапазон – нижняя частота – верхняя частота	0 Гц 10^3 Гц	10^{-2} Гц 10^6 Гц
Собственные шумы на частотах – 10^0 Гц – 10^1 Гц – 10^2 Гц – 10^4 Гц и выше	$6 \cdot 10^{-12}$ Тл/Гц ^{1/2}	10^{-11} Тл/Гц ^{1/2} $3 \cdot 10^{-11}$ Тл/Гц ^{1/2} 10^{-12} Тл/Гц ^{1/2} менее $2 \cdot 10^{-13}$ Тл/Гц ^{1/2}
Рабочий диапазон температур	от минус 40 до 70 °С	от минус 40 до 70 °С
Напряжение питания	от ±12 В до ±17 В	±12 В ±10%
Энергопотребление	менее 1,5 Вт	менее 1 Вт
Габариты	Ø 25x225 мм	78x34x27 мм
Масса	83 г	менее 100 г

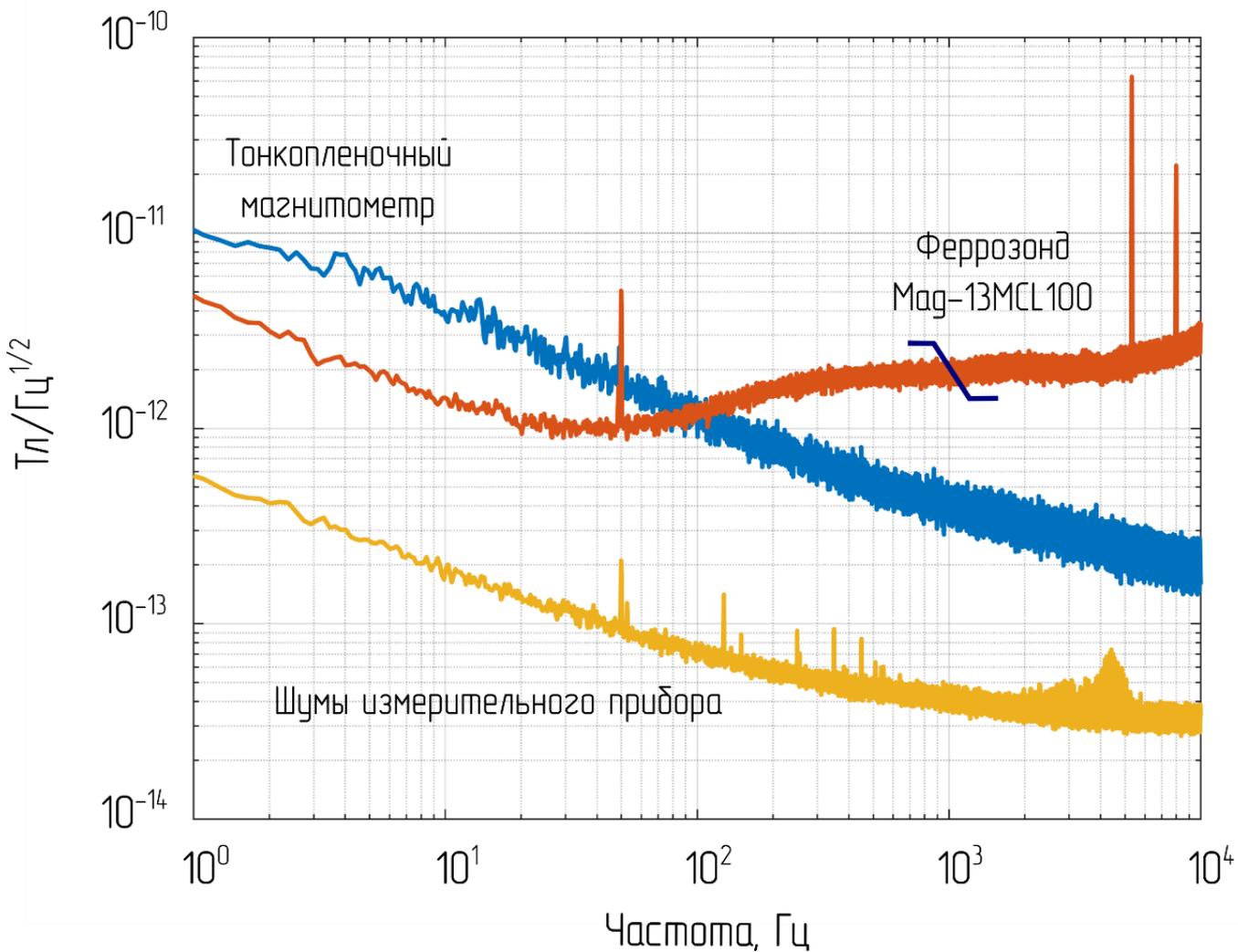


Датчик на ТМП

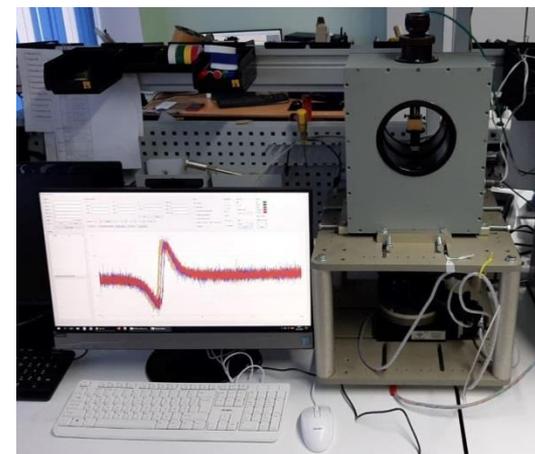
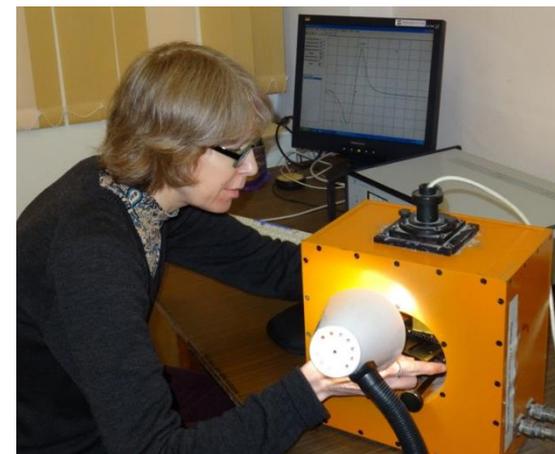
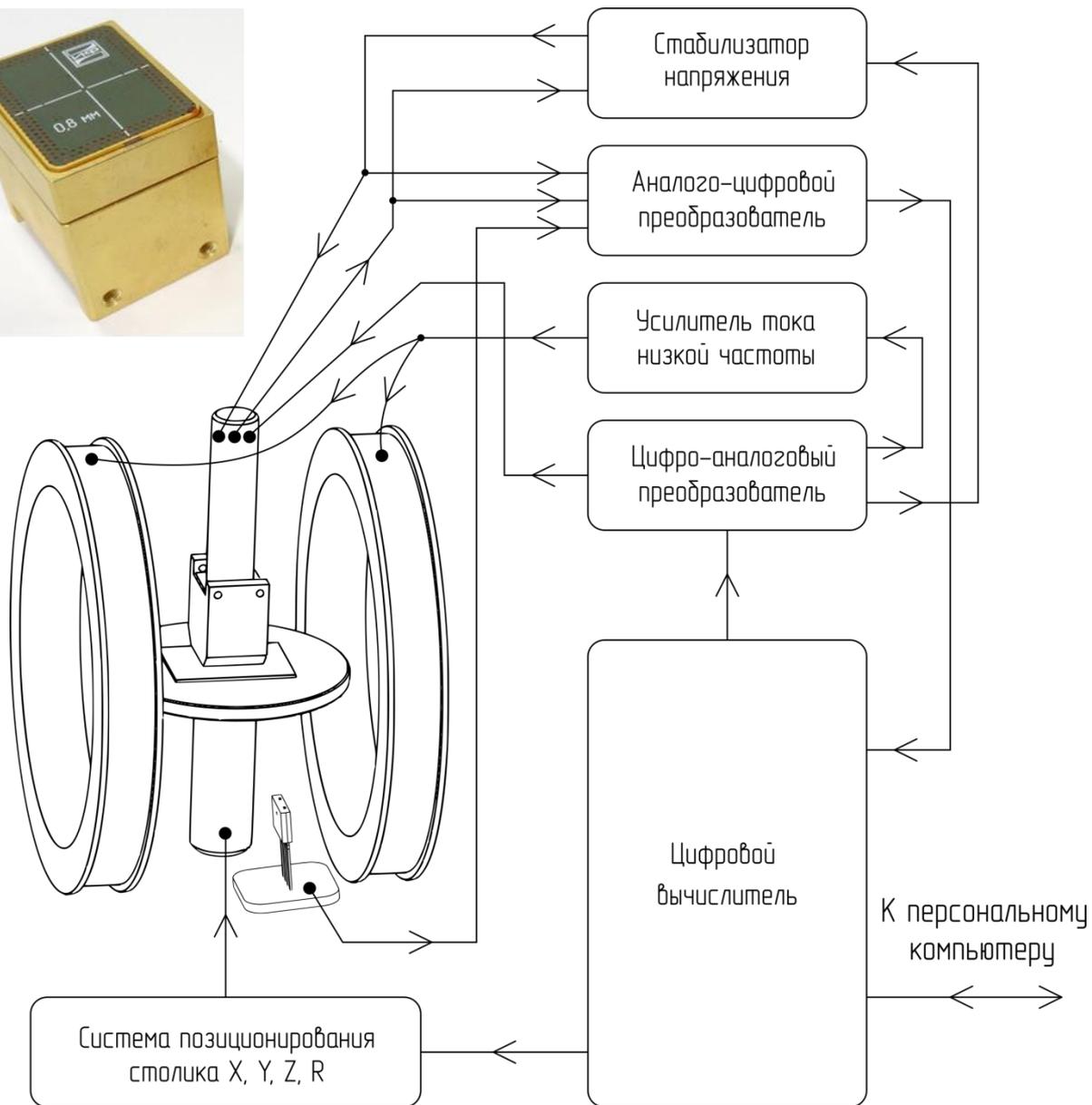


Феррозонд
Bartington
Mag-13MCL100

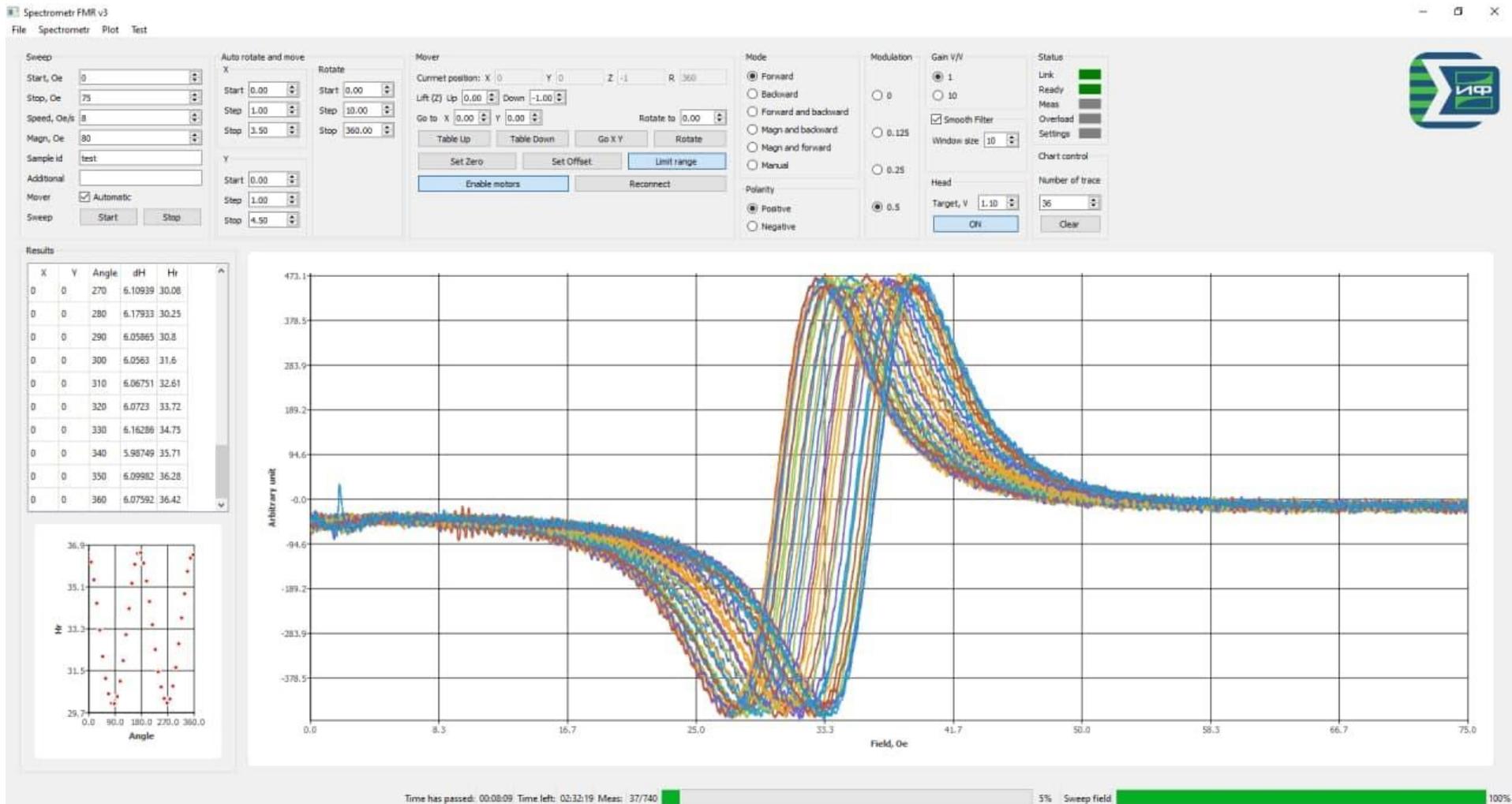
Измерения уровня шумов датчиков слабых магнитных полей



Сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса

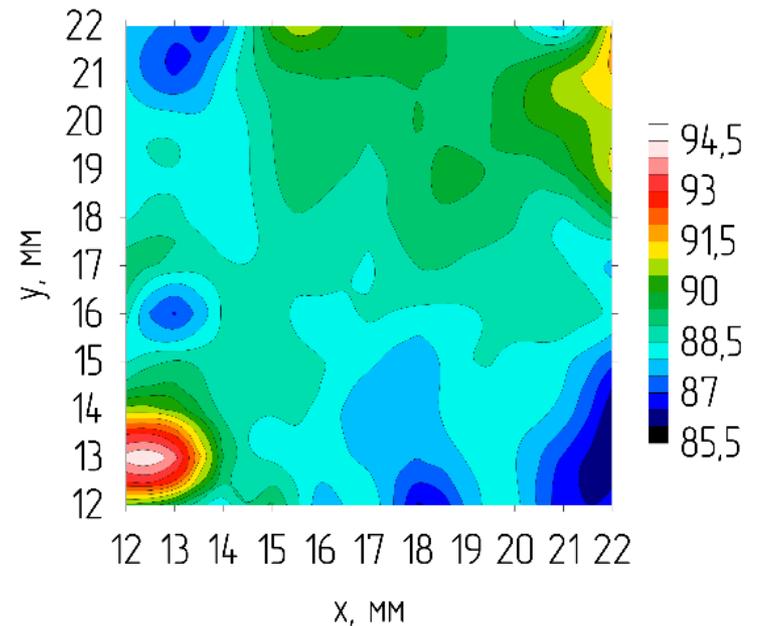
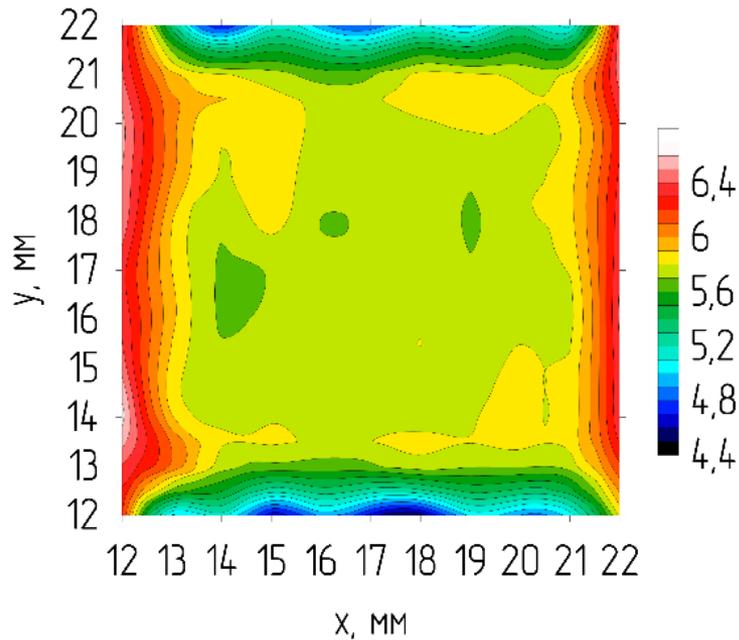
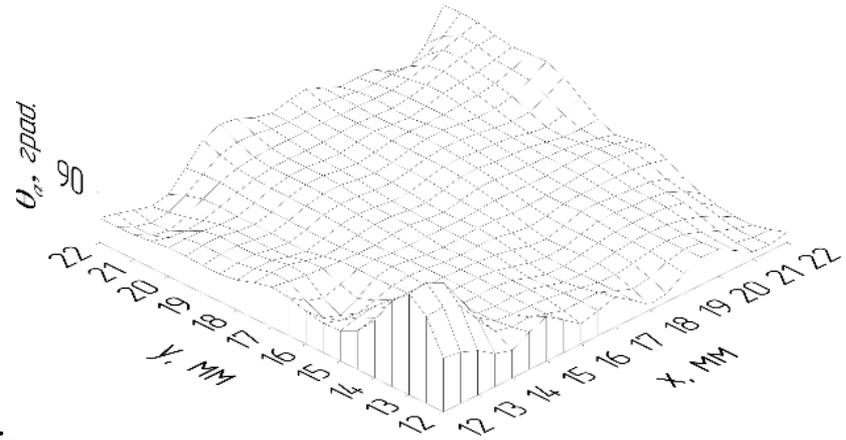
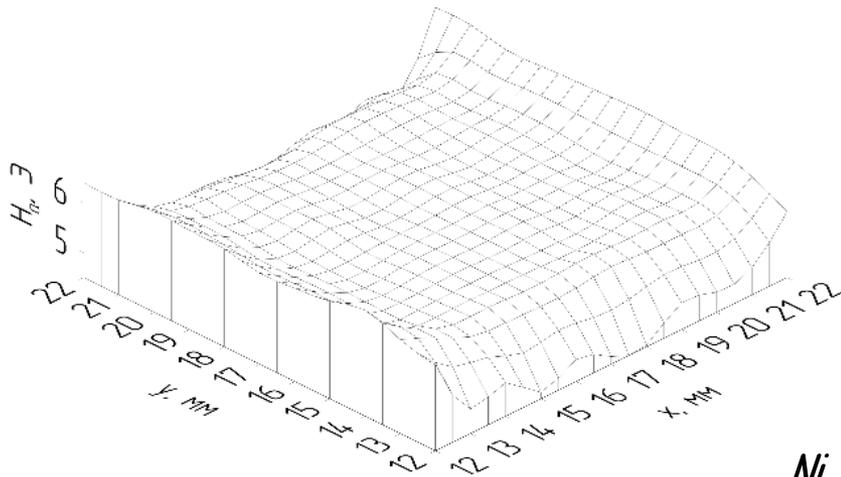


Сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса. Программный интерфейс полностью автоматизированного измерительного комплекса. Пример измерений

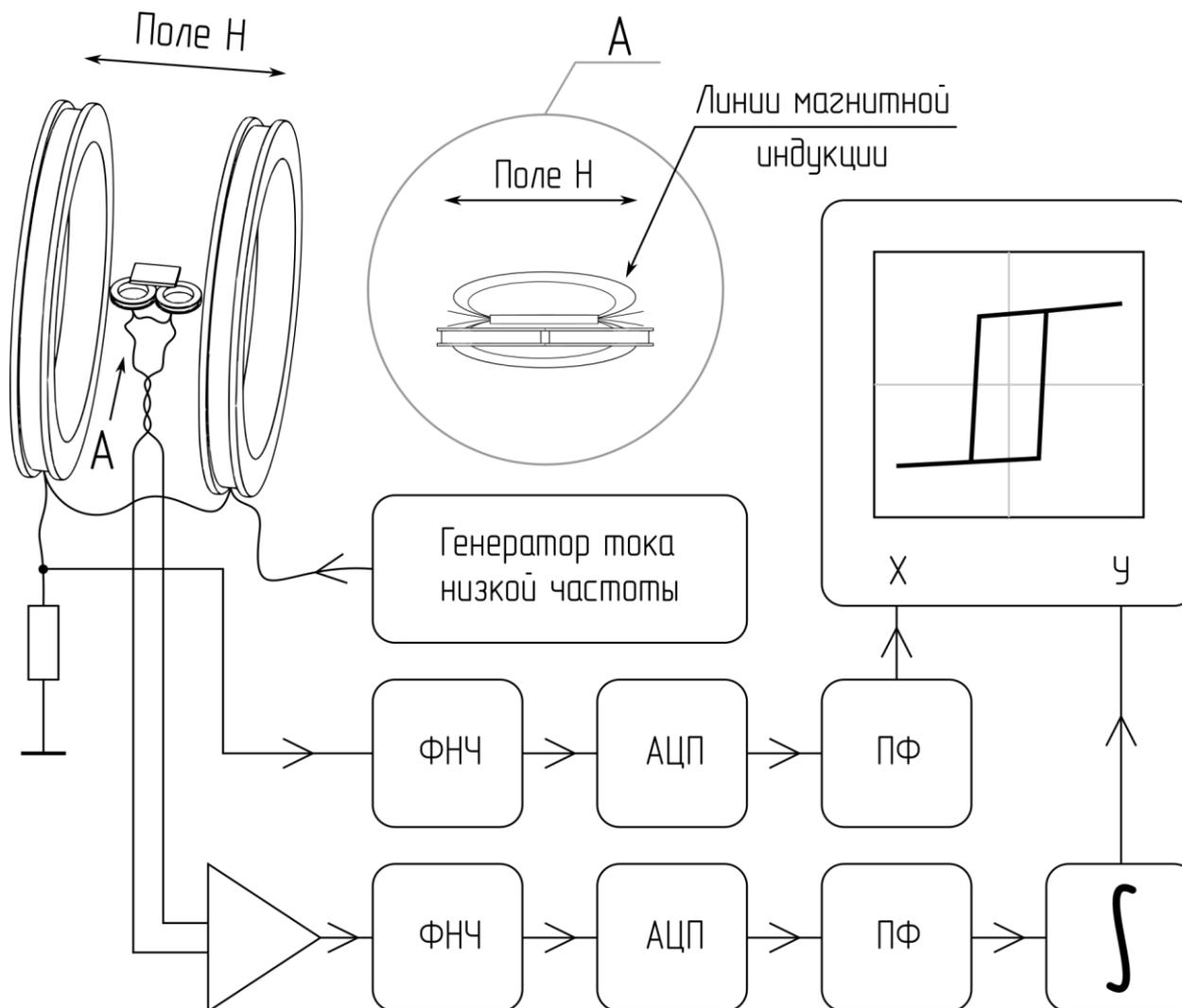


Сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса.

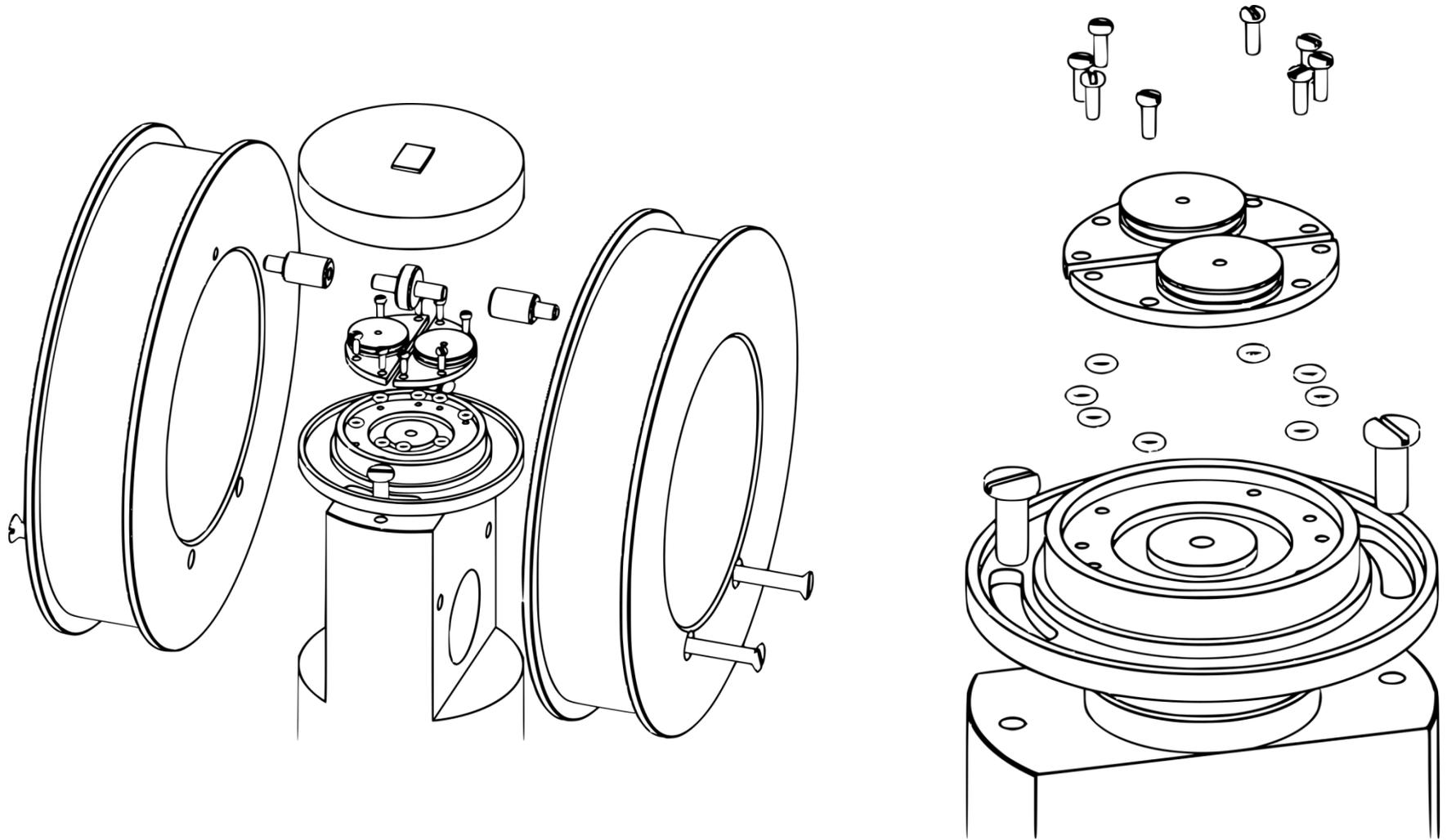
Распределения магнитных характеристик по площади ТМП:
величина поля анизотропии; направление поля анизотропии



Феррометр для регистрации петель гистерезиса тонких магнитных пленок. Функциональная схема

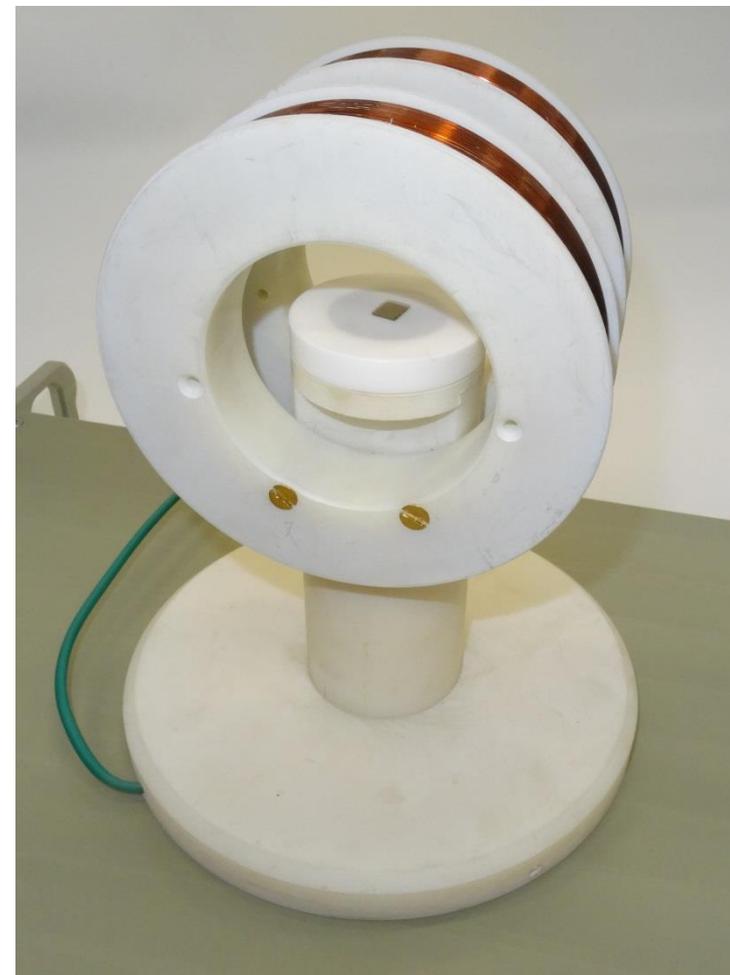
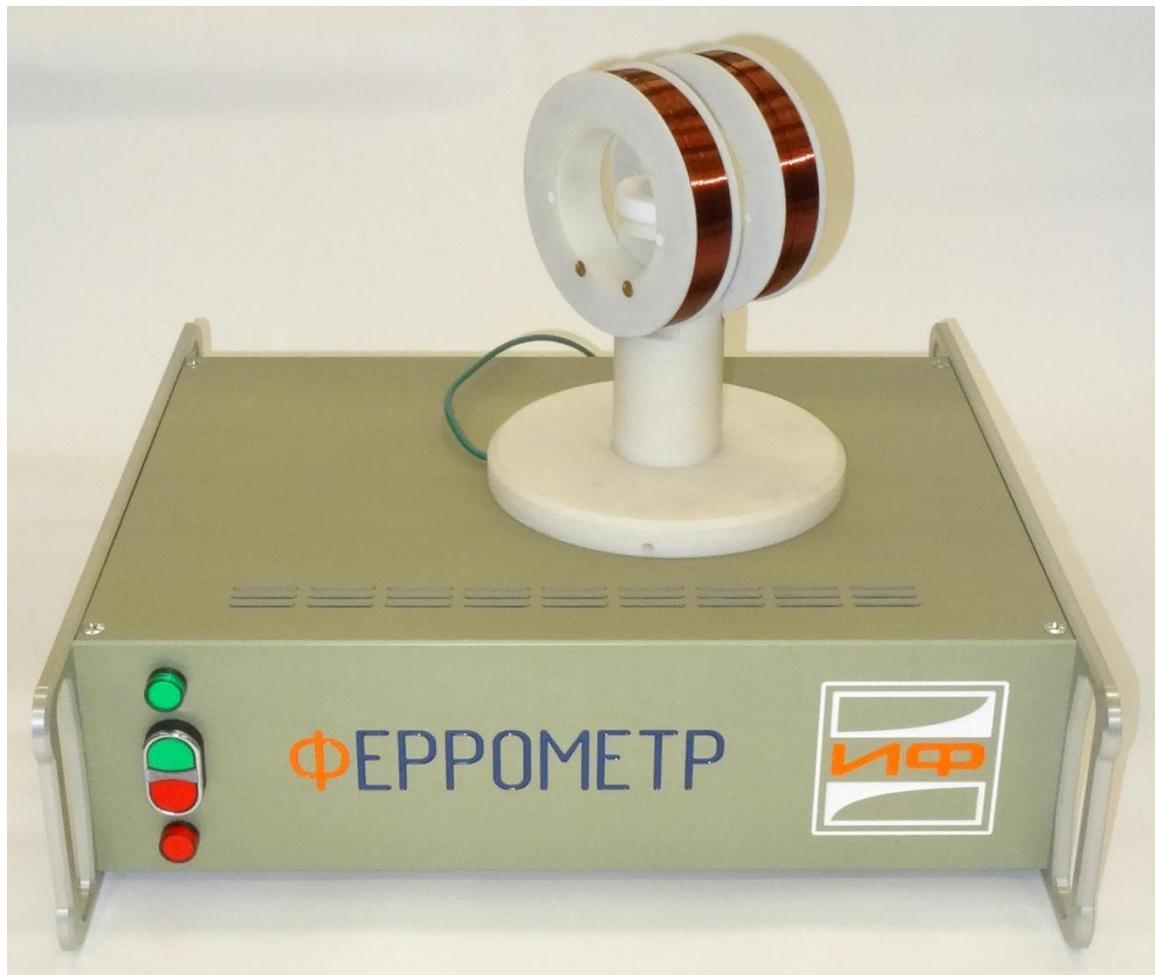


Феррометр для регистрации петель гистерезиса тонких магнитных пленок. Конструкция



Устройство чувствительного элемента разработанного в ИФ СО РАН феррометра
для тонких магнитных пленок

Феррометр для регистрации петель гистерезиса тонких магнитных пленок



Разработанный в ИФ СО РАН феррометр для тонких магнитных пленок

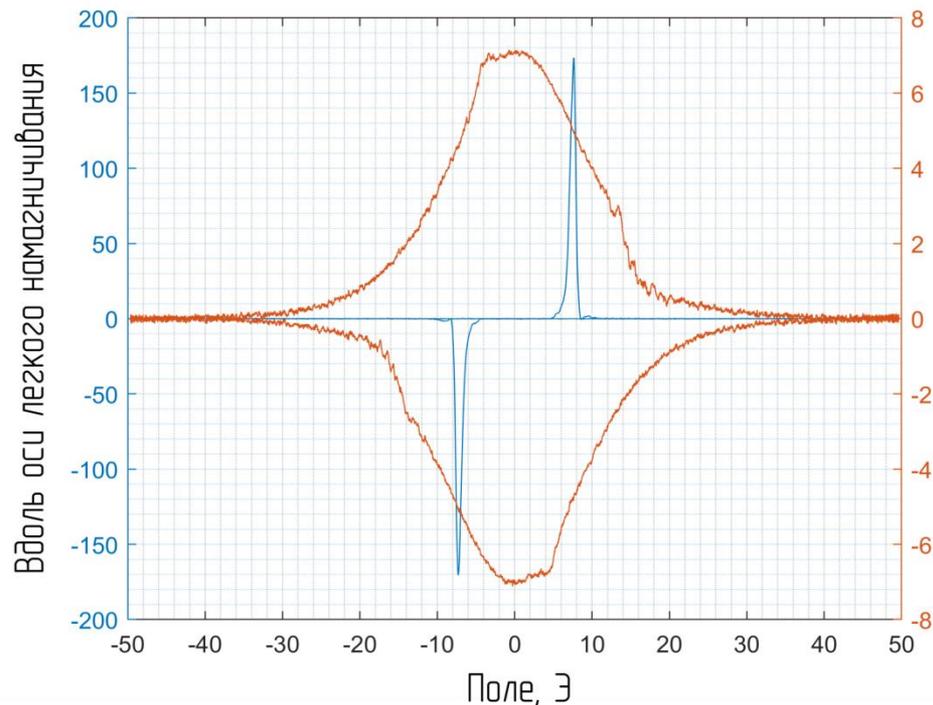
Размещение образца пермаллоя размерами 12x8 мм на измерительном столике

Феррометр для регистрации петель гистерезиса тонких магнитных пленок.

Результаты измерений образца $Ni_{80}Fe_{20}$

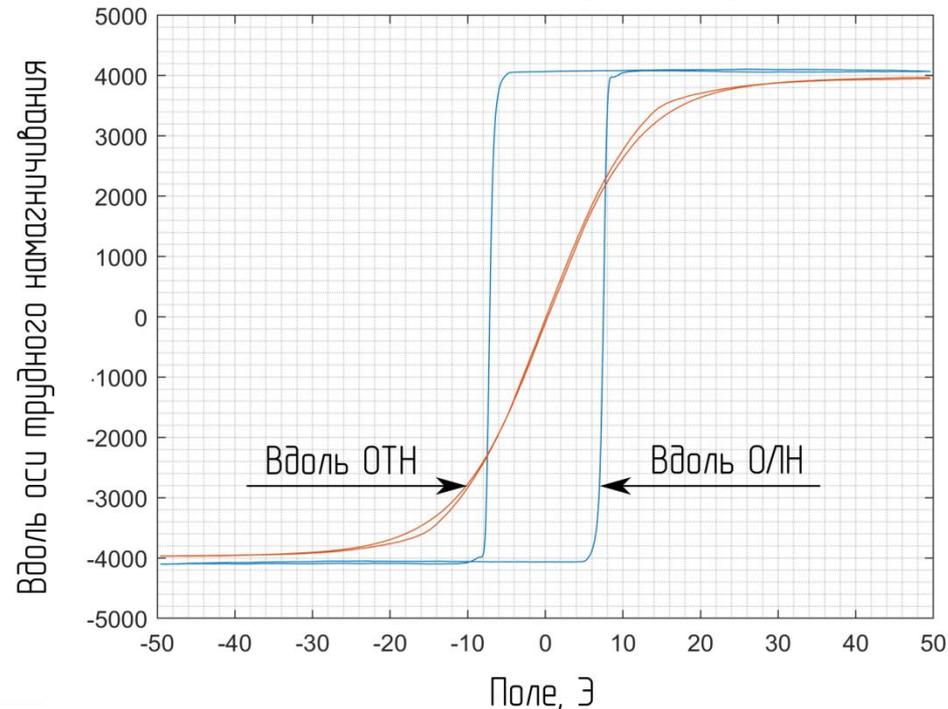


Сигнал с измерительных катушек, произв. ед.



Дифференциальная кривая для двух направлений ориентации тонкопленочного образца пермаллоя

Сигнал с выхода интегратора, произв. ед.

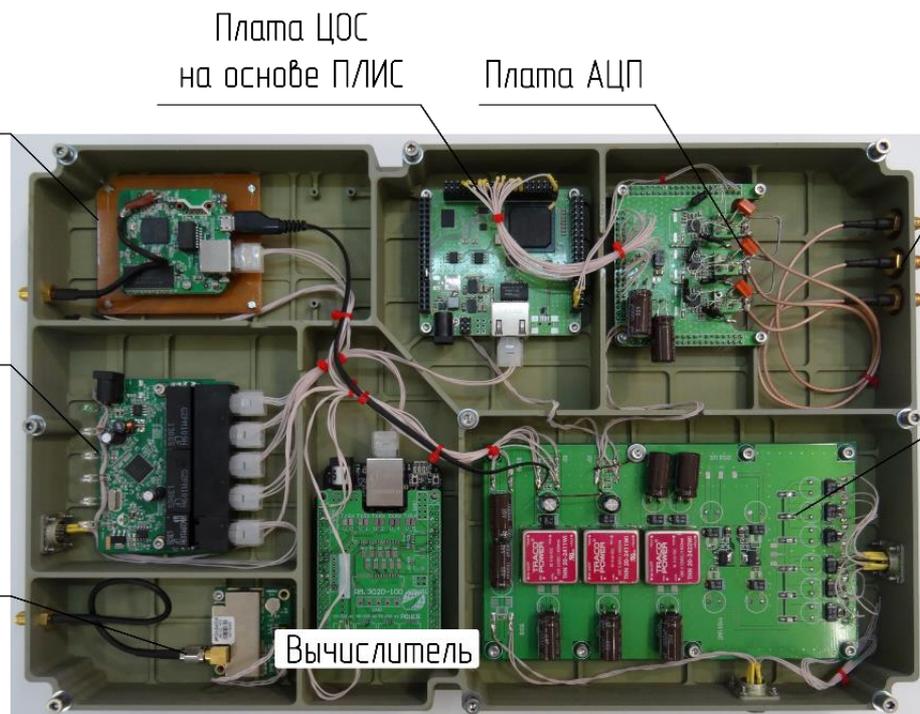


Петли гистерезиса для двух направлений ориентации тонкопленочного образца пермаллоя

ОТН – ось трудного намагничивания образца
ОЛН – ось легкого намагничивания образца

Применение разработанных датчиков слабых магнитных полей

- Электромагнитные геофизические исследования.
- Ближнепольные системы магнитной связи.
- Магнитный контроль трубопроводов.
- Другие применения, где требуется широкая полоса частот и высокая чувствительность.



Точка доступа,
Маршрутизатор

Плата ЦОС
на основе ПЛИС

Плата АЦП

Входы АЦП
X Y Z

Коммутатор
Ethernet

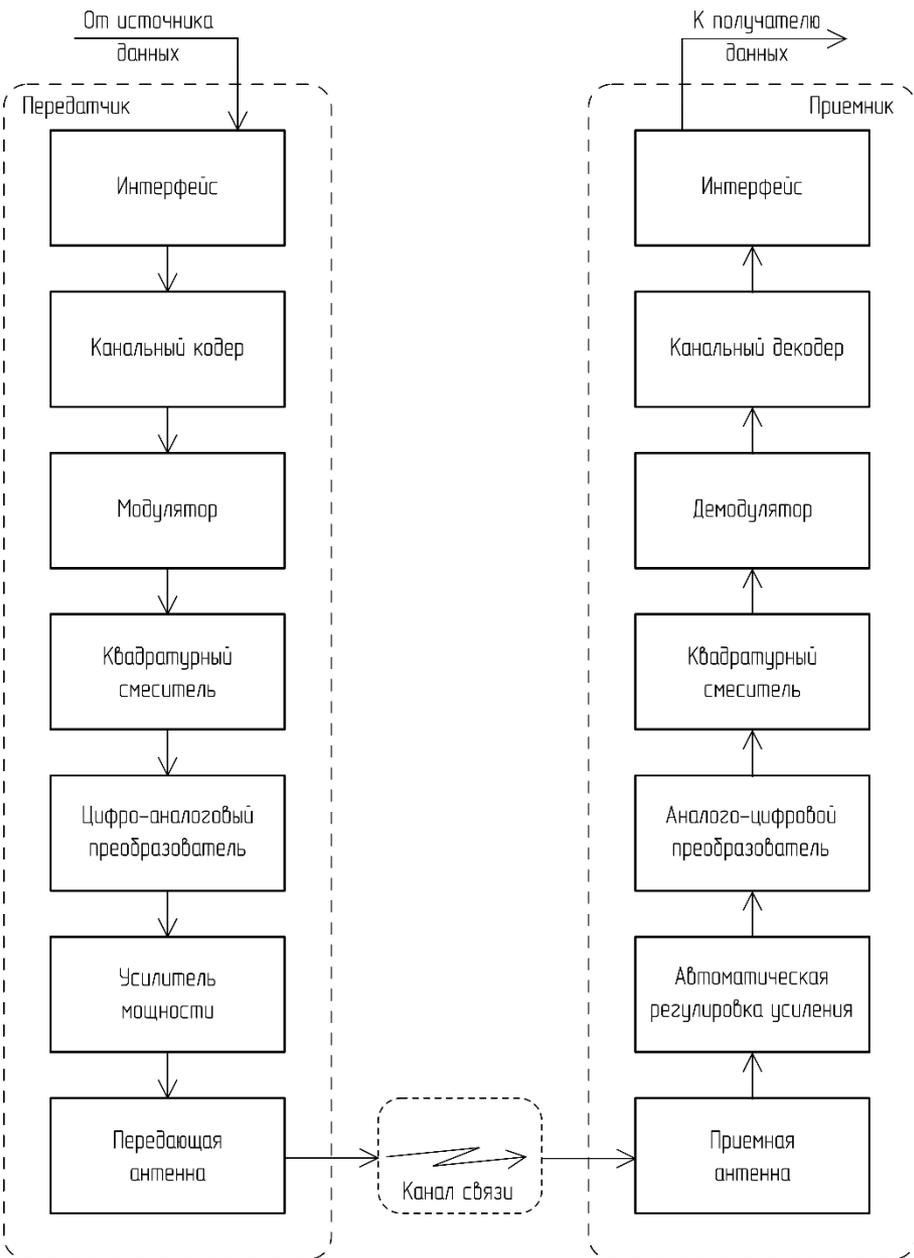
Система
питания

Приемник
СРНС

Вычислитель

Блок оцифровки, цифровой обработки и хранения сигналов магнитометров

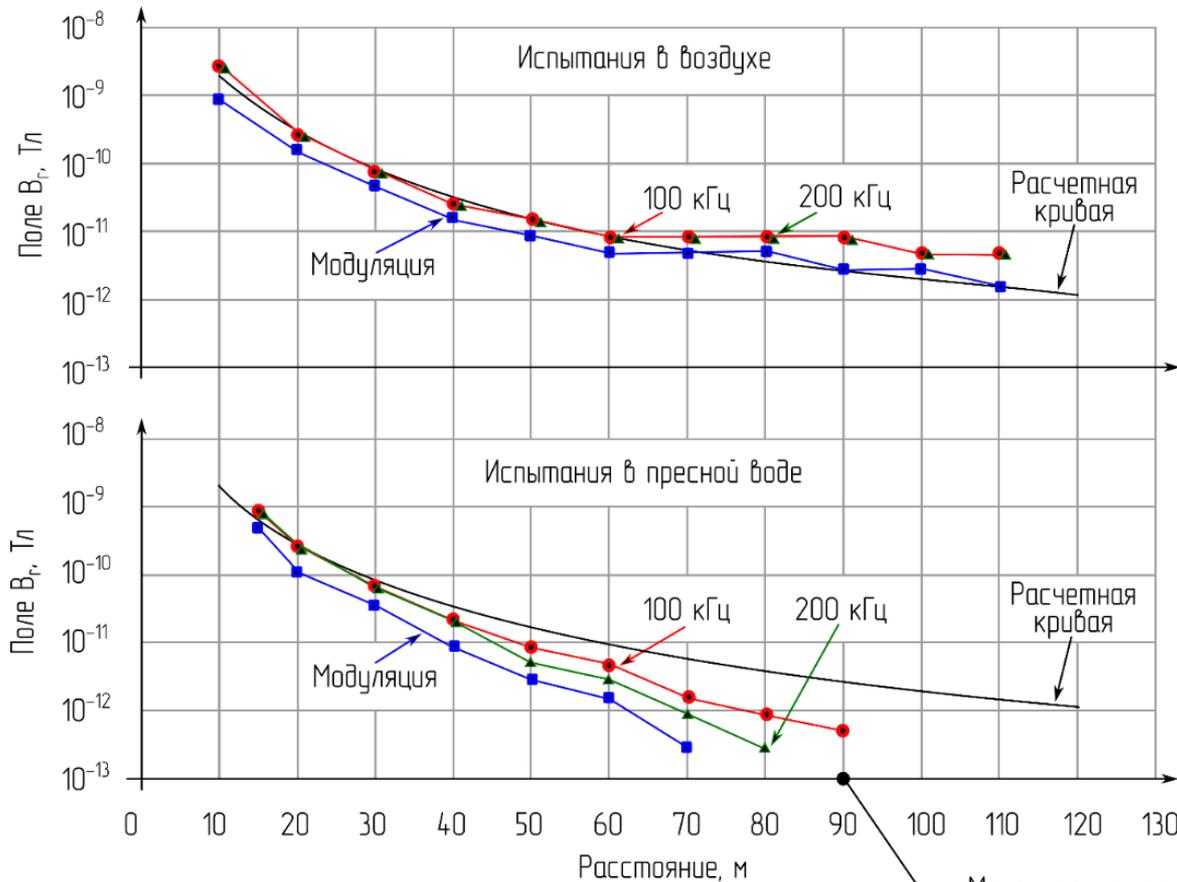
Ближнепольные магнитные системы передачи цифровой информации



Испытания ближнепольной магнитной системы цифровой связи. Водохранилище Красноярской ГЭС

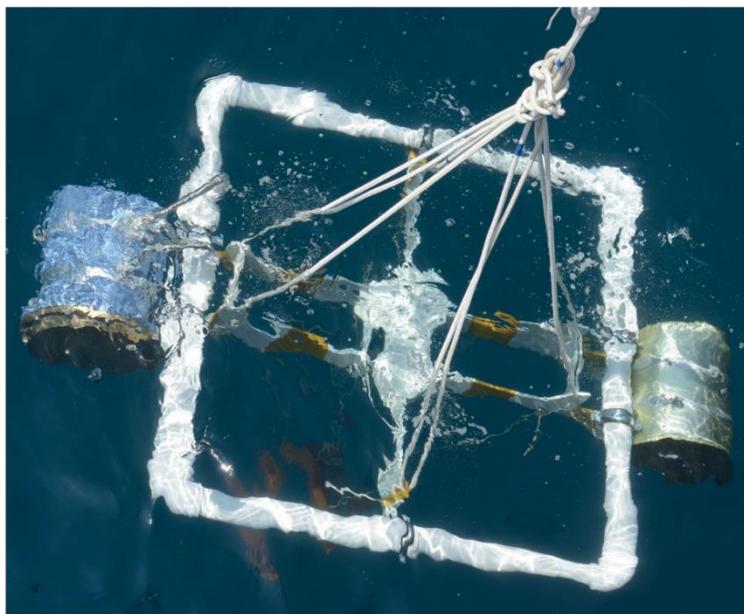


Спуск передатчика ближнепольной системы связи в прорубь на Красноярском водохранилище



Максимальная глубина водохранилища

Испытания ближнепольной магнитной системы цифровой связи. Черное море





Объединенный ученый совет СО РАН по физическим наукам. Доклад №8

Широкополосный магнитометр слабых магнитных полей на основе микрорезонансного резонатора с тонкой магнитной пленкой



Академик
Киренский Леонид Васильевич



Академик
Шабанов Василий Филиппович

Спасибо за внимание!

Докладчик: к.ф.-м.н., зав. лаб.
Научного приборостроения ИФ СО РАН,
Боев Никита Михайлович

Красноярск, 12.11.2020

Конец!