



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01R 33/05 (2023.02)

(21)(22) Заявка: 2022130884, 28.11.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.11.2022

Дата регистрации:
14.03.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.11.2022

(45) Опубликовано: 14.03.2023 Бюл. № 8

Адрес для переписки:

660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50,
ФИЦ КНЦ СО РАН

(72) Автор(ы):

Горчаковский Александр Антонович (RU),
Подшивалов Иван Валерьевич (RU),
Боев Никита Михайлович (RU),
Клешнина Софья Андреевна (RU),
Соловьев Платон Николаевич (RU),
Изотов Андрей Викторович (RU),
Крёков Сергей Дмитриевич (RU),
Бурмитских Антон Владимирович (RU),
Негодеева Ирина Александровна (RU),
Волошин Александр Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение "Федеральный
исследовательский центр "Красноярский
научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2747100 C1, 26.04.2021. US
7268546 B2, 11.09.2007. RU 2747912 C1,
17.05.2021. SU 1125521 A1, 23.11.1984.

(54) Спектрометр ферромагнитного резонанса

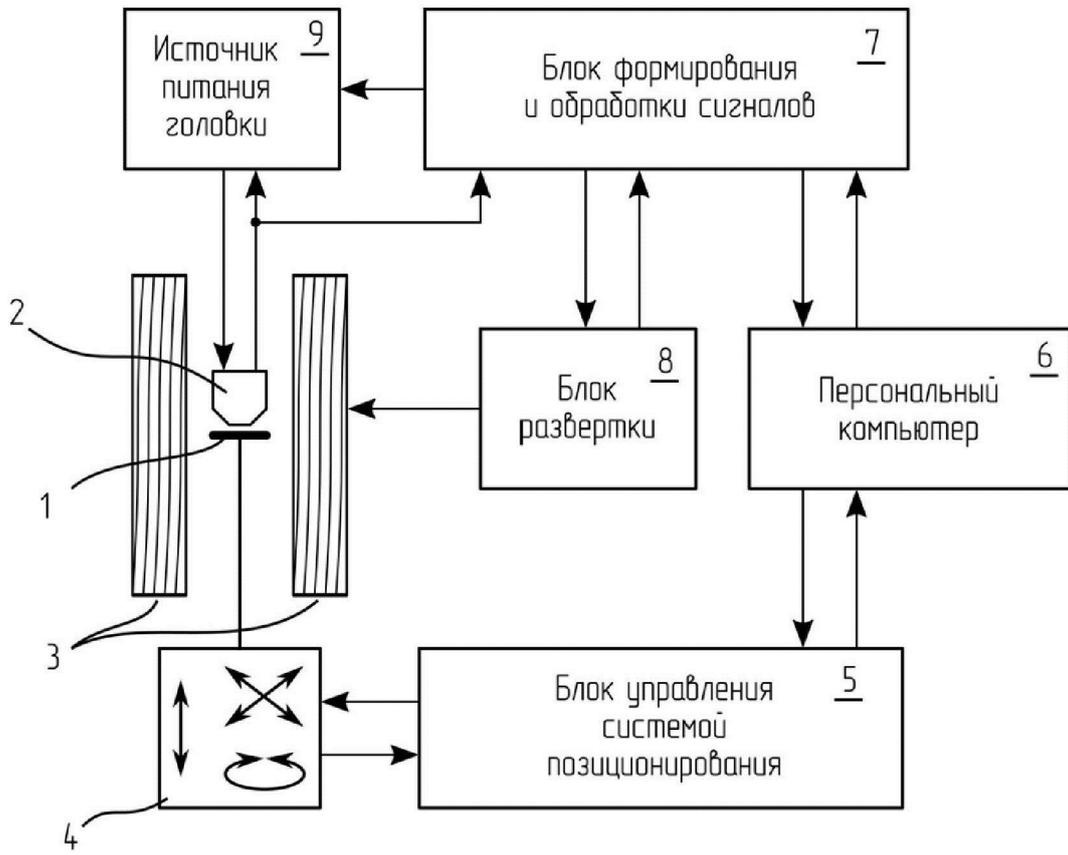
(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике. Спектрометр ферромагнитного резонанса содержит чувствительный элемент – СВЧ-головку, столик, на котором размещается исследуемый образец тонкой магнитной пленки, кольца Гельмгольца, цифровые блоки формирования сигналов развертки и модуляции, автоматизированную систему позиционирования столика, при этом кольца Гельмгольца

подключены к блоку развертки, который является работающим в классе D усилителем, а питание СВЧ-головки осуществляется от управляемого источника питания, включающего соединенные последовательно повторитель, интегрирующий усилитель ошибки, ограничитель напряжения и усилитель тока. Технический результат – повышение точности и скорости измерений, снижение уровня собственных шумов. 5 ил.

RU 2 791 860 C1

RU 2 791 860 C1



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01R 33/05 (2023.02)

(21)(22) Application: **2022130884, 28.11.2022**

(24) Effective date for property rights:
28.11.2022

Registration date:
14.03.2023

Priority:

(22) Date of filing: **28.11.2022**

(45) Date of publication: **14.03.2023** Bull. № 8

Mail address:

**660036, g. Krasnoyarsk, ul. Akademgorodok, 50,
FITS KNTS SO RAN**

(72) Inventor(s):

**Gorchakovskii Aleksandr Antonovich (RU),
Podshivalov Ivan Valerevich (RU),
Boev Nikita Mikhailovich (RU),
Kleshnina Sofia Andreevna (RU),
Solovev Platon Nikolaevich (RU),
Izotov Andrei Viktorovich (RU),
Krekov Sergei Dmitrievich (RU),
Burmitskikh Anton Vladimirovich (RU),
Negodeeva Irina Aleksandrovna (RU),
Voloshin Aleksandr Sergeevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe
nauchnoe uchrezhdenie "Federalnyi
issledovatel'skii tsentr "Krasnoiarskii nauchnyi
tsentr Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii
nauk" (RU)**

(54) **FERROMAGNETIC RESONANCE SPECTROMETER**

(57) Abstract:

FIELD: measuring technique.

SUBSTANCE: ferromagnetic resonance spectrometer consists of a sensitive element - a microwave head, a table on which the studied sample of a thin magnetic film is placed, Helmholtz rings, digital modules for generating sweep and modulation signals, an automated system for positioning the table, while the Helmholtz rings are connected to the sweep

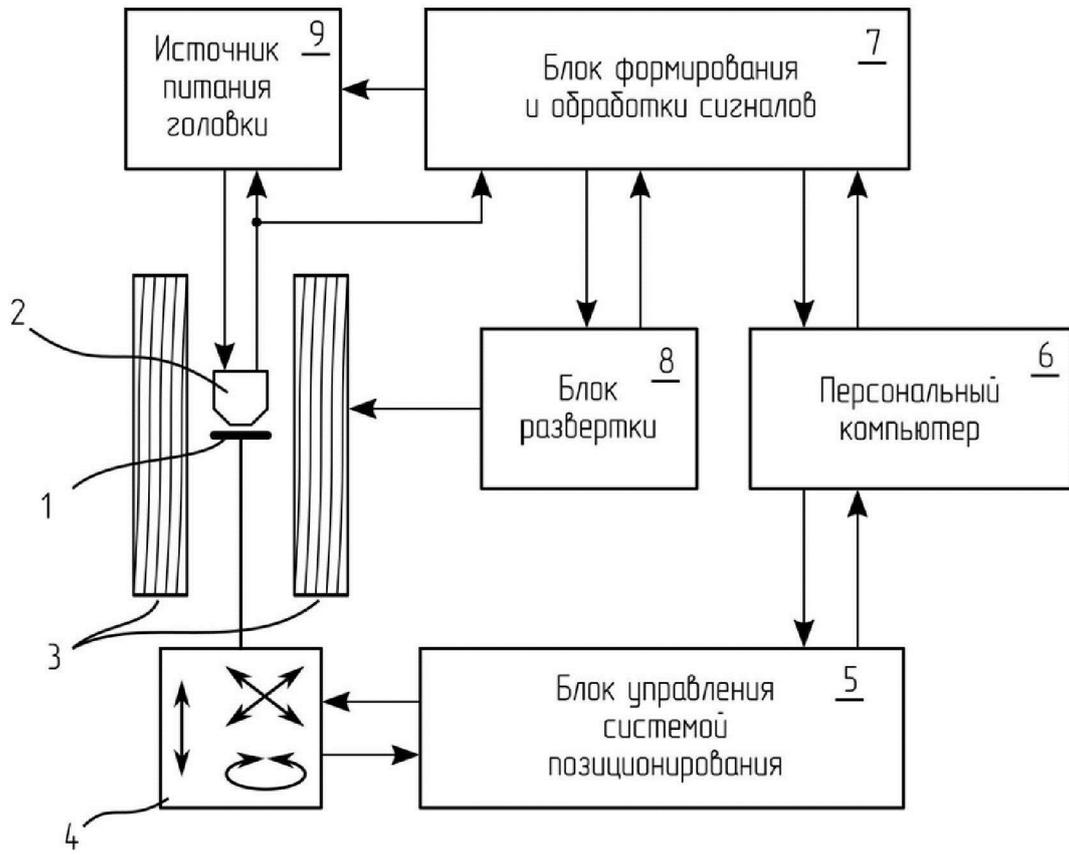
module, which is operating in class D by an amplifier, and the microwave head is powered from a controlled power source, including a series-connected repeater, an integrating error amplifier, a voltage limiter and a current amplifier.

EFFECT: increase in the accuracy and speed of measurements, a decrease in the level of intrinsic noise.

1 cl, 5 dwg

C1
2791860
RU

RU
2791860
C1



Фиг. 1

Изобретение относится к измерительной технике и предназначено для неразрушающего контроля качества и однородности тонких магнитных пленок (ТМП) путем регистрации спектров ферромагнитного (ФМР) резонанса с малых участков исследуемых образцов.

5 Известен микроволновый магнитный микроскоп, работающий на частоте ~10 ГГц [Sooho R. F. A microwave magnetic microscope // Jour. Appl. Phys., Suppl. 1962. Vol. 33(3). P. 1276–1277]. Устройство представляет собой сканирующий спектрометр ФМР, позволяющий проводить измерения параметров резонансных спектров на локальных участках ТМП. По результатам этих измерений определяются магнитные
10 характеристики локальных участков исследуемых образцов. Исследуемый образец размещается с внешней стороны задней стенки СВЧ-резонатора, имеющей в центре небольшое отверстие, благодаря которому только малый локальный участок образца подвержен непосредственному воздействию СВЧ-поля резонатора. Спектр ФМР снимается путем изменения постоянного магнитного поля, приложенного к образцу
15 ортогонально СВЧ-магнитному полю резонатора. Распределения магнитных характеристик по площади ТМП измеряют путем перемещения образца относительно отверстия в резонаторе.

Известен также спектрометр ферромагнитного резонанса [Беляев Б. А., Лексиков А. А., Макиевский И. Я., Тюрнев В. В. Спектрометр ферромагнитного
20 резонанса // ПТЭ. 1997. №3. С. 106–111], состоящий из трех блоков. Первый блок устройства – блок датчика, содержащий СВЧ-головку, столик, на котором размещается исследуемый образец ТМП, кольца Гельмгольца и катушки модуляции. Столик может перемещаться по двум измеряемым координатам в горизонтальной плоскости и поворачиваться вокруг оси, совпадающей с осью головки. Кольца Гельмгольца создают
25 постоянное магнитное поле развертки, модулируемое с частотой 1 кГц. Амплитуда модулирующего поля задается пользователем. Второй блок – блок формирования сигнала, состоящий из аналогового канала приема сигнала, узла развертки и модуляции, узла управления приводом столика и контроллера, осуществляющего связь с персональным компьютером. Третьим блоком является персональный компьютер, на
30 экране которого в режиме реального времени отображается измеряемый спектр ФМР.

Наиболее близким аналогом является сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса [Патент РФ №2747100, МПК G01R 33/05, опубл. 26.04.2021, Бюл. №12 (прототип)]. Устройство содержит чувствительный элемент – СВЧ-головку, столик, на котором размещается исследуемый образец ТМП, кольца Гельмгольца, цифровой блок
35 формирования сигнала модуляции, цифровой блок формирования сигнала развертки, систему позиционирования столика. Детектирование сигнала осуществляется цифровым квадратурным синхронным детектором. Для формирования модулирующего магнитного поля и магнитного поля развертки используются одни общие кольца Гельмгольца. Позиционирование столика с измеряемым образцом полностью автоматизировано.

40 Недостатками известных конструкций и устройства-прототипа являются низкие точность и скорость измерений, что вызвано использованием в качестве управляемых источников тока для колец Гельмгольца классических линейных усилителей, обладающих рядом недостатков. Также известные конструкции и устройство-прототип обладают высоким уровнем собственных шумов.

45 Техническим результатом заявляемого изобретения является повышение точности и скорости измерений, снижение уровня собственных шумов.

Заявляемый технический результат достигается тем, что в спектрометре ферромагнитного резонанса, содержащем чувствительный элемент – СВЧ-головку,

столлик, на котором размещается исследуемый образец тонкой магнитной пленки, кольца Гельмгольца, цифровые блоки формирования сигналов развертки и модуляции, автоматизированную систему позиционирования столика, *новым является то, что* кольца Гельмгольца подключены к блоку развертки, который является работающим в классе D усилителем, а питание СВЧ-головки осуществляется от управляемого источника питания, включающего соединенные последовательно повторитель, интегрирующий усилитель ошибки, ограничитель напряжения и усилитель тока.

Сопоставительный анализ с прототипом показывает, что заявляемое устройство отличается наличием блока развертки, который является работающим в классе D усилителем, нагруженным на кольца Гельмгольца. Это позволяет повысить скорость и точность измерений.

Вторым существенным отличием является наличие управляемого источника питания, который используется для питания СВЧ-головки. Источник питания включает последовательно соединенные блоки: повторитель, интегрирующий усилитель ошибки, ограничитель напряжения и усилитель тока. Использование заявленного управляющего источника питания снижает уровень собственных шумов спектрометра ферромагнитного резонанса.

Таким образом, перечисленные выше отличительные от прототипа признаки позволяют сделать вывод о соответствии заявляемого технического решения критерию «новизна».

Признаки, отличающие заявляемое техническое решение от прототипа, не выявлены в других технических решениях и, следовательно, обеспечивают заявляемому решению соответствие критерию «изобретательский уровень».

Данное изобретение поясняется чертежами. На фиг. 1 представлена функциональная схема спектрометра ферромагнитного резонанса. На фиг. 2 показана функциональная схема блока развертки. На фиг. 3 отображена структурная схема источника питания СВЧ-головки. Конструкция спектрометра ферромагнитного резонанса показана на фиг. 4. На фиг. 5 в качестве примера приведен результат работы спектрометра.

Спектрометр ферромагнитного резонанса содержит (фиг. 1) измерительный столлик (1), над которым закреплена СВЧ-головка (2). Измерительный столлик (1) и СВЧ-головка (2) размещены внутри магнитной системы (3). Измерительный столлик (1) закреплен в системе позиционирования (4), предназначенной для перемещения измерительного столика (1) с исследуемым образцом ТМП в четырех координатах: в плоскости образца «XY», по вертикали «Z» и вокруг оси СВЧ-головки (2) «R». Система позиционирования (4) подключена к блоку управления (5), который соединен с персональным компьютером (6). Также к персональному компьютеру (6) подключен блок формирования и обработки сигналов (7), соединенный с блоком развертки (8) и источником питания (9) СВЧ-головки (2). Блок развертки (8) включает (фиг. 2) дифференциальный усилитель ошибки (10), выходы которого подключены к сумматорам (11). Выходы сумматоров (11) присоединены ко входам компаратора (12), выходы которого подключены к силовым ключам (13). Выходы силовых ключей (13) подключены ко входам фильтров нижних частот (14). Фильтры нижних частот (14) подключены параллельно на входы фильтров нижних частот (15) и на формирующие фильтры (16). В свою очередь фильтры нижних частот (15) подключены параллельно ко входам формирующих фильтров (17) и к кольцам Гельмгольца (18), выполняющим роль магнитной системы заявляемого спектрометра ферромагнитного резонанса. Выходы формирующих фильтров (16) и (17) подключены ко входам сумматоров (11). Между отдельными катушками колец Гельмгольца (18)

последовательно включен токоизмерительный шунт (19), выходы которого присоединены ко входам дифференциального усилителя (20). Выход дифференциального усилителя (20) подключен к инвертирующему входу усилителя ошибки (10), к неинвертирующему входу которого подключена сигнальная линия управления блоком развертки – сигнал уставки. Источник питания СВЧ-головки включает (фиг. 3) повторитель (21), ко входу которого подключена сигнальная линия с выхода детектора СВЧ-головки, а выход присоединен к инвертирующему входу интегрирующего усилителя ошибки (22). К неинвертирующему входу интегрирующего усилителя ошибки (22) подключен фильтр нижних частот (23), а выход интегрирующего усилителя ошибки (22) подключен ко входу ограничителя напряжения (24). Ко входу фильтра нижних частот (23) подключен управляющий выход блока формирования и обработки сигналов (7), величина напряжения на котором определяет режим работы регенератора (автодина) СВЧ-головки. Выход ограничителя напряжения (24) подключен ко входу усилителя тока (25), ко второму входу которого подключен источник тока (26). Выход усилителя тока (25) подключен ко входу питания СВЧ-головки. Спектрометр ферромагнитного резонанса состоит из двух блоков (фиг. 4): блока электроники (27) и измерительной системы (28). На основании (29) измерительной системы закреплена система позиционирования, включающая поворотную ось «R» (30), ось линейного перемещения «X» (31), ось линейного перемещения «Y» (32) и ось вертикального перемещения «Z» (33), на которой закреплён столик (1) с исследуемым образцом (34) ТМП. Сверху над образцом (34) закреплена СВЧ-головка (2). Столик (1) с образцом (34) и СВЧ-головка (2) расположены внутри колец Гельмгольца (18). На верхней части измерительной системы закреплено устройство юстирования (35) СВЧ-головки, предназначенное для перемещения штока (36) с СВЧ-головкой (2) в плоскости «XY».

Спектрометр ферромагнитного резонанса работает следующим образом (фиг. 4). С помощью устройства юстирования (35) добиваются соосности между измерительным столиком (1) и осью СВЧ-головки (2). На измерительном столике (1) размещают исследуемый образец (34) ТМП. В программном обеспечении на персональном компьютере (6) задают (фиг. 1) параметры работы спектрометра: интервал измерений по полю развертки; направление изменения поля развертки; величину намагничивающего поля; скорость развертки по постоянному полю; амплитуду поля модуляции; координаты точек измерений в плоскости «XY» и шаг по углу. В соответствии с заданными требованиями блок формирования и обработки сигналов (7) формирует сигнал уставки для блока развертки (8). Блок развертки (8) является (фиг. 2) усилителем, работающем в классе D. Общее описание работы усилителя блока развертки приведено в патенте [Патент США US 2005/0162228 A1, H03F 3/217, опубл. 28.07.2005], однако заявляемый усилитель имеет существенное отличие: с целью снижения уровня шумов в выходном сигнале добавлены фильтры нижних частот (15) и формирующие фильтры (16), а для повышения точности воспроизведения магнитного поля усилитель охвачен обратной связью по току, реализованной с помощью токоизмерительного шунта (19), дифференциального усилителя (20) и дифференциального усилителя ошибки (10). Измерительное отверстие СВЧ-головки (2) находится (фиг. 1) над исследуемым в данный момент участком образца ТМП. Принцип работы СВЧ-головки (2) изложен в патенте [Патент РФ №2691996, G01R 33/60, G01N 24/10, Опубл. 19.06.2019, Бюл. 17]. С целью снижения уровня собственных шумов спектрометра ферромагнитного резонанса в заявляемом изобретении используется оригинальная конструкция источника питания (9) СВЧ-головки (2). Сигнал с детектора СВЧ-головки (2) поступает (фиг. 3) через повторитель (21) на

вход интегрирующего усилителя ошибки (22), а затем на ограничитель напряжения (24) и на усилитель тока (25). Выходной сигнал усилителя тока (25) подается на вход питания СВЧ-головки. Предложенная схема источника питания (9) СВЧ-головки (2) позволяет (фиг. 1) поддерживать оптимальный режим работы чувствительного элемента устройства и повысить чувствительность спектрометра. Спектры ферромагнитного резонанса отображаются в режиме реального времени на экране персонального компьютера (6).

Экспериментальные исследования заявленного спектрометра ферромагнитного резонанса показали, что устройство обеспечивает более высокие в сравнении с устройством-прототипом точность и скорость измерений, а также низкий уровень собственных шумов. Например, проведено измерение параметров спектров ферромагнитного резонанса тонкопленочного образца пермаллоя толщиной 25 Å. Использована СВЧ-головка, работающая на частоте 1318,1 МГц; площадь круглого измерительного отверстия СВЧ-головки – 0,5 мм². Число накоплений спектров – 100. Как видно из фиг. 5, наблюдается хорошее отношение сигнал/шум.

(57) Формула изобретения

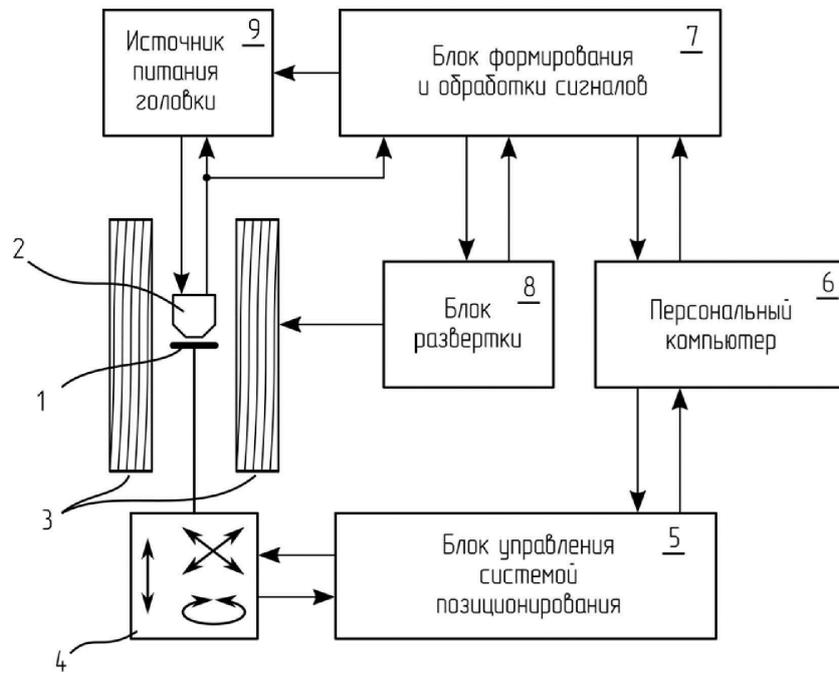
Спектрометр ферромагнитного резонанса, содержащий чувствительный элемент – СВЧ-головку, столик, на котором размещается исследуемый образец тонкой магнитной пленки, кольца Гельмгольца, цифровые блоки формирования сигналов развертки и модуляции, автоматизированную систему позиционирования столика, отличающийся тем, что кольца Гельмгольца подключены к блоку развертки, который является работающим в классе D усилителем, а питание СВЧ-головки осуществляется от управляемого источника питания, включающего соединенные последовательно повторитель, интегрирующий усилитель ошибки, ограничитель напряжения и усилитель тока.

30

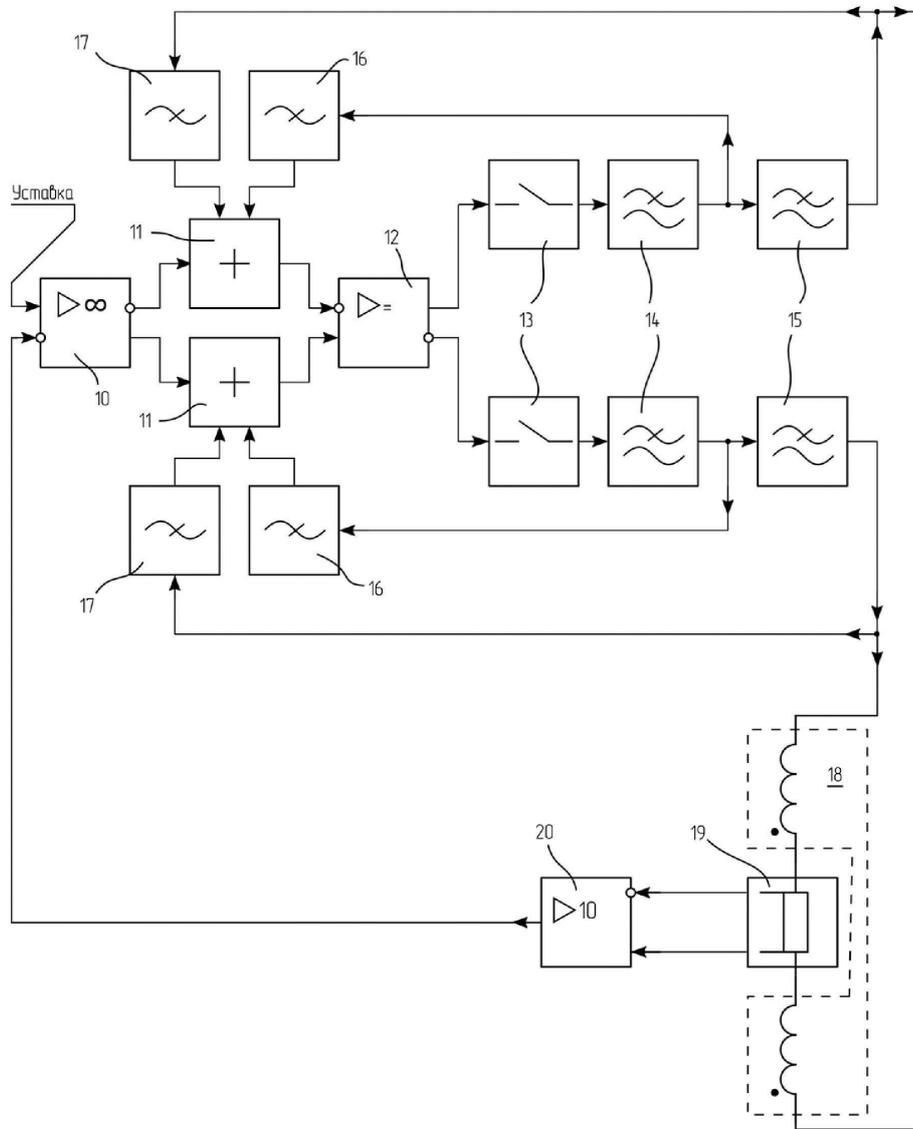
35

40

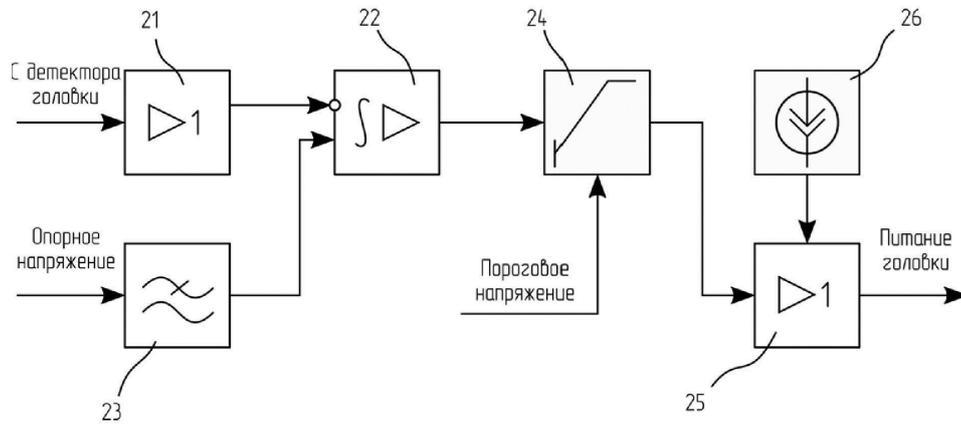
45



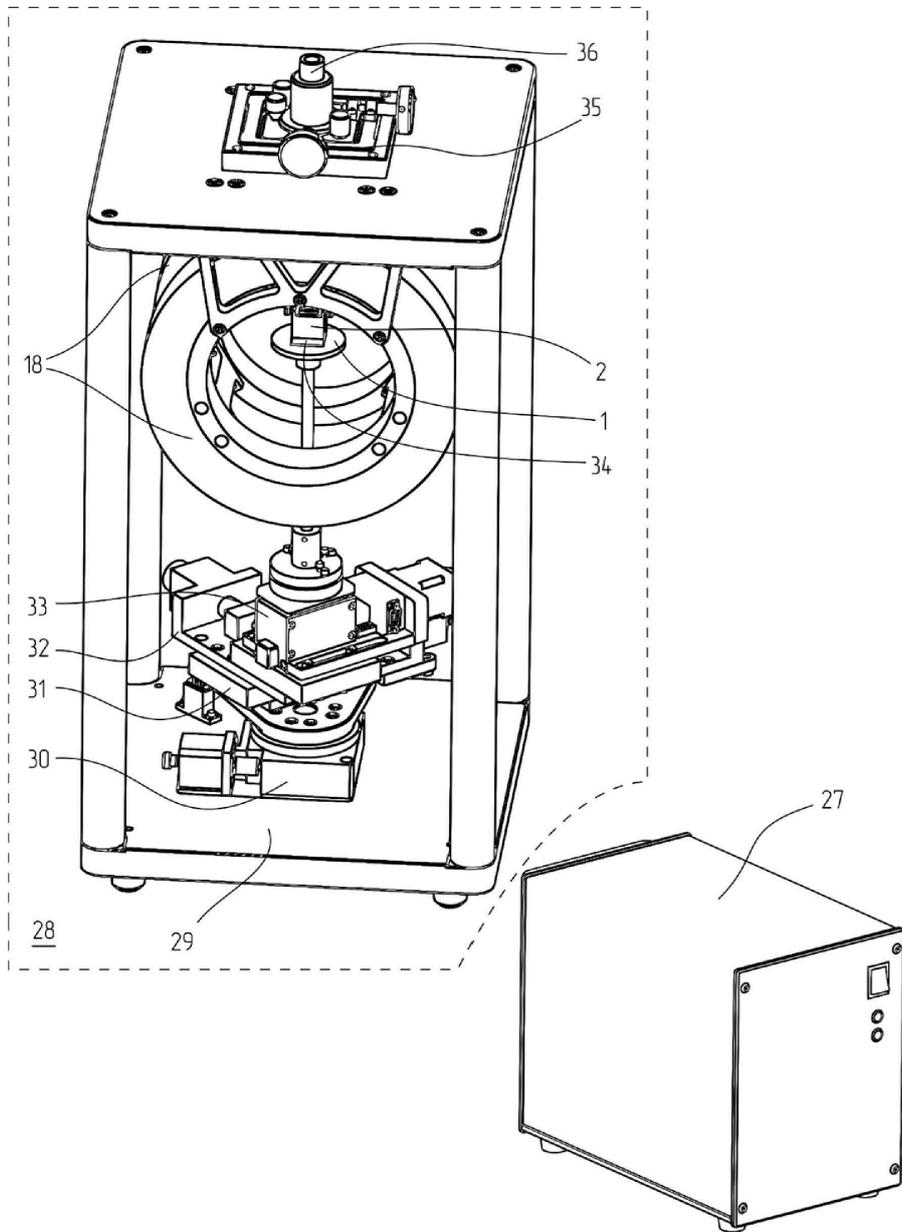
Фиг. 1



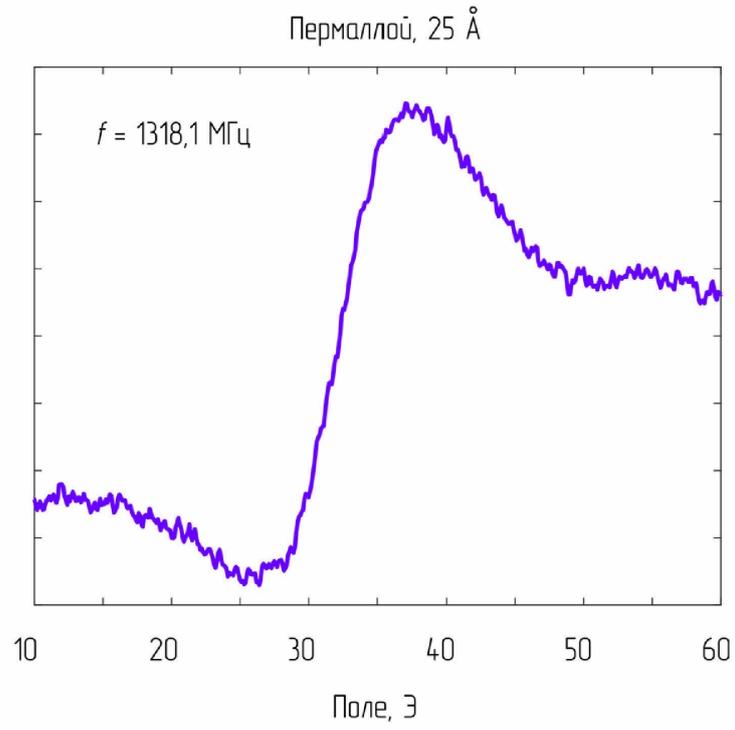
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5