

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 614 181** ⁽¹³⁾ **C1**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
[G01N 24/10 \(2006.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: прекратил действие, но может быть восстановлен (последнее изменение статуса:
27.08.2018)

(21)(22) Заявка: [2015150145](#), 23.11.2015(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.11.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.11.2015

(45) Опубликовано: [23.03.2017](#) Бюл. № [9](#)(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 1739751 A1, 10.10.1995. SU
744310 A1, 30.06.1980. SU 219862 A1,
14.06.1968. US 3532965 A, 06.10.1970.

Адрес для переписки:

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19,
Уральский федеральный университет,
Центр интеллектуальной собственности,
Невраевой Н.П.

(72) Автор(ы):

**Рокеах Александр Ицкович (RU),
Артёмов Михаил Юрьевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

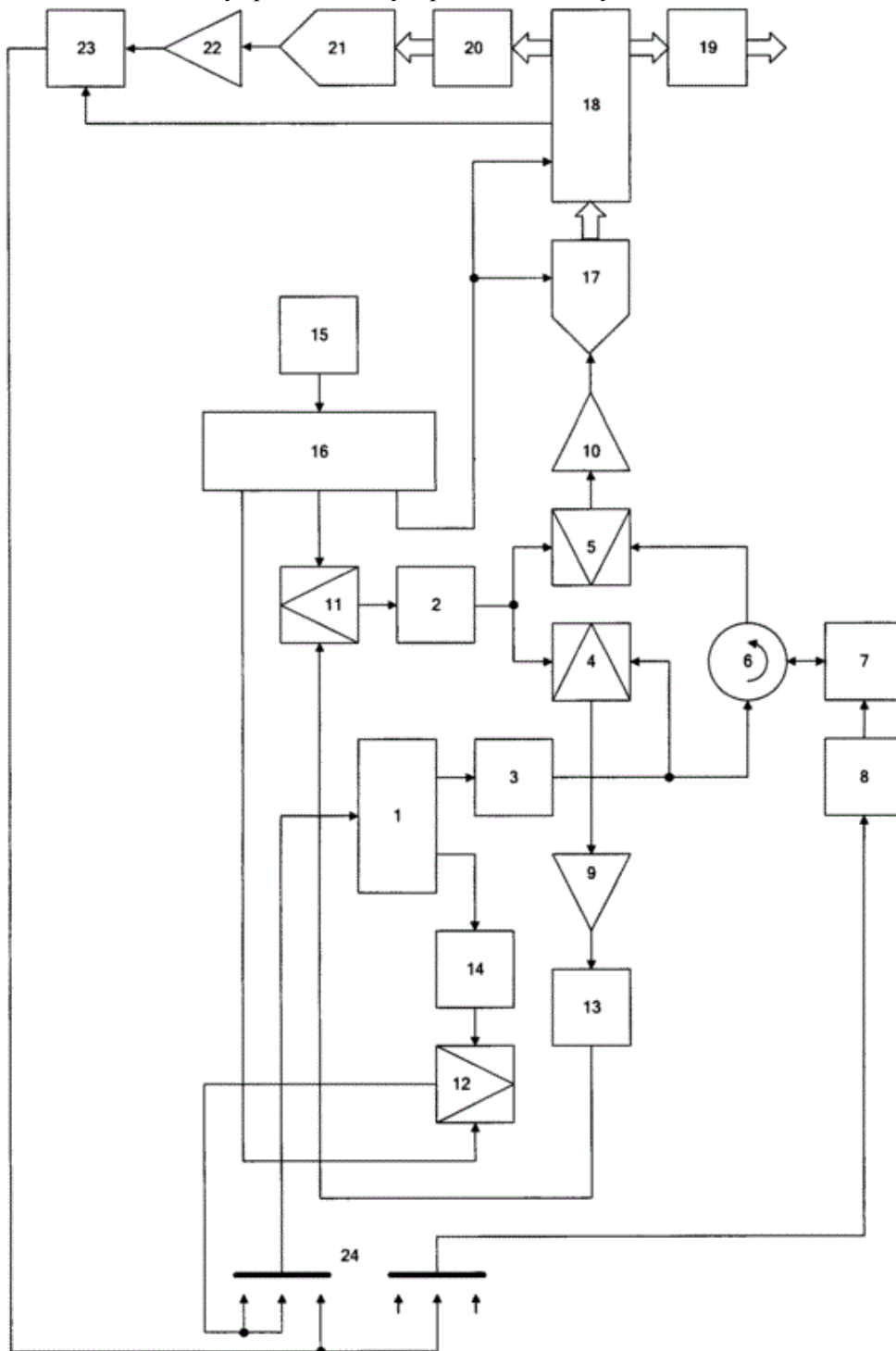
**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина" (RU)**

(54) Когерентный супергетеродинный спектрометр электронного парамагнитного резонанса

(57) Реферат:

Изобретение относится к технической физике и может быть использовано при изготовлении спектрометров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Устройство содержит сигнальный 1 и гетеродинный 2 генераторы СВЧ, измерительный аттенюатор 3, смеситель опорного 4 и сигнального 5 каналов, циркулятор 6, измерительный резонатор 7 с элементом перестройки его резонансной частоты 8, УПЧ опорного 9 и сигнального 10 каналов, фазочастотные дискриминаторы 11 и 12, делители частоты 13 и 14, опорный генератор 15, устройство синтеза частот 16, аналого-цифровой преобразователь 17, устройство селекции выборок 18, дециматоры синфазного 19 и квадратурного 20 каналов, цифро-аналоговый преобразователь 21, усилитель переменного тока 22, импульсный демодулятор 23 и трехпозиционный переключатель 24. Технический результат

заключается в упрощении устройства и увеличении надежности. 1 ил.



Изобретение относится к технической физике и может быть использовано при изготовлении спектрометров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Известен спектрометр ЭПР (Патент на полезную модель РФ №136578, МПК G01N 24/10, опубликован 10.01.2014), содержащий сигнальный и гетеродинный генераторы СВЧ, смесители опорного и сигнального каналов, циркулятор с измерительным резонатором и элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, измерительный аттенуатор, усилители промежуточной частоты (УПЧ) опорного и сигнального каналов, два фазочастотных дискриминатора с фильтрами на выходах, два синхронных детектора, два делителя частоты, опорный генератор, устройство синтеза частот и переключатель режимов работ.

Недостатком устройства является невысокая точность взаимной стабилизации резонансной частоты измерительного резонатора и сигнального генератора, что связано с ограничением возможного усиления сигнала, пропорционального величине взаимной расстройки вследствие присутствия нежелательных напряжений смещения и шумов синхронного детектора и усилителя в видеополосе канала усиления.

Наиболее близким к изобретению является спектрометр ЭПР (Патент на полезную модель РФ №152736, МПК G01N 24/10, опубликован 20.06.2015), содержащий

сигнальный и гетеродинный генераторы СВЧ, смесители опорного и сигнального каналов, циркулятор с измерительным резонатором и элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, измерительный аттенюатор, усилители промежуточной частоты (УПЧ) опорного и сигнального каналов, два фазочастотных дискриминатора с фильтрами на выходах, два синхронных детектора, два делителя частоты, опорный генератор, устройство синтеза частот и переключатель режимов работ, импульсный модулятор фазы ($0/\pi$), усилитель переменного тока, импульсный демодулятор с фильтром на выходе, при этом основной выход сигнального генератора соединен со входом измерительного аттенюатора, а его выход соединен с первым плечом циркулятора, и сигнальным входом смесителя опорного канала, выход гетеродинного генератора соединен с гетеродинным входом смесителя опорного канала и с гетеродинным входом смесителя сигнального канала, второе плечо циркулятора соединено с измерительным резонатором, снабженным элементом перестройки его резонансной частоты, третье плечо циркулятора соединено со входом смесителя сигнального канала, а его выход - со входом УПЧ сигнального канала, выход которого соединен с сигнальными входами первого и второго синхронных детекторов, опорный вход первого синхронного детектора соединен с выходом устройства синтеза частот, опорный вход первого фазочастотного дискриминатора соединен со вторым выходом устройства синтеза частот, причем величина частоты на нем равна частоте первого выхода, деленной на коэффициент деления первого делителя частоты, а фаза регулируется, выход смесителя опорного канала соединен со входом усилителя промежуточной частоты, выполненного в виде нормирующего усилителя формирователя напряжения, а его выход соединен со входом первого делителя частоты, выход которого соединен со вторым входом первого фазочастотного дискриминатора, вспомогательный выход сигнального генератора соединен с делителем частоты, выход которого соединен с одним из входов второго фазочастотного дискриминатора, второй вход которого соединен с выходом устройства синтеза частот, выход первого фазочастотного дискриминатора соединен с управляющим электродом гетеродинного генератора, выход второго фазочастотного дискриминатора соединен с двумя контактами первой группы трехпозиционного переключателя, общий контакт которой соединен с управляющим электродом сигнального генератора, общий контакт второй группы соединен с элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, а выход опорного генератора соединен со входом устройства синтеза частот, вход импульсного модулятора соединен с выходом устройства синтеза частот с частотой, равной частоте на опорном входе первого синхронного детектора и сдвигом фазы на $\pi/2$, выход модулятора соединен с опорным входом второго синхронного детектора, а управляющий вход с дополнительным выходом устройства синтеза частот, выход второго синхронного детектора соединен со входом усилителя переменного тока, выход которого соединен со входом импульсного демодулятора, управляющий вход которого соединен с дополнительным выходом устройства синтеза частот, а выход через фильтр соединен с контактами в обеих группах трехпозиционного переключателя.

Недостатком устройства является сложность как самого устройства, так, особенно, его настройки, что связано со значительным проникновением гетеродинного сигнала аналоговых смесителей на их выход, приводящего к необходимости применения сложных цепей компенсации и фильтрации нежелательных сигналов в канале усиления.

Задача изобретения - существенное упрощение устройства и исключение процедуры его настройки, увеличение возможного усиления в канале, что приводит к уменьшению остаточной расстройки измерительного резонатора и сигнального генератора, следовательно, к повышению чувствительности спектрометра.

Поставленная задача решается за счет того, что когерентный супергетеродинный спектрометр ЭПР, включающий сигнальный и гетеродинный генераторы СВЧ, смесители опорного и сигнального каналов, циркулятор с измерительным резонатором и элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, измерительный аттенюатор, усилители промежуточной частоты (УПЧ) опорного и сигнального каналов, два фазочастотных дискриминатора с фильтрами на выходах, два делителя частоты, опорный генератор, устройство синтеза частот, усилитель переменного тока, импульсный демодулятор с фильтром на выходе, и переключатель режимов работ, при этом основной выход сигнального генератора соединен со входом измерительного аттенюатора, а его выход соединен с первым плечом циркулятора, и сигнальным входом смесителя опорного канала, выход гетеродинного генератора соединен с гетеродинным входом смесителя опорного канала и с гетеродинным входом смесителя сигнального канала, второе плечо

циркулятора соединено с измерительным резонатором, снабженным элементом перестройки его резонансной частоты, третье плечо циркулятора соединено со входом смесителя сигнального канала, а его выход - со входом УПЧ сигнального канала, опорный вход первого фазочастотного дискриминатора соединен с выходом устройства синтеза частот, причем величина частоты на нем равна требуемой промежуточной частоте, деленной на коэффициент деления первого делителя частоты, а фаза регулируется, выход смесителя опорного канала соединен со входом усилителя промежуточной частоты, выполненного в виде нормирующего усилителя формирователя напряжения, а его выход соединен со входом первого делителя частоты, выход которого соединен со вторым входом первого фазочастотного дискриминатора, вспомогательный выход сигнального генератора соединен с делителем частоты, выход которого соединен с одним из входов второго фазочастотного дискриминатора, второй вход которого соединен с выходом устройства синтеза частот, выход первого фазочастотного дискриминатора соединен с управляющим электродом гетеродинного генератора, выход второго фазочастотного дискриминатора соединен с двумя контактами первой группы трехпозиционного переключателя, общий контакт которой соединен с управляющим электродом сигнального генератора, общий контакт второй группы соединен с элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, выход опорного генератора соединен со входом устройства синтеза частот, выход усилителя переменного тока соединен со входом импульсного демодулятора, а выход через фильтр соединен с контактами в обеих группах трехпозиционного переключателя, согласно изобретению дополнительно содержит аналого-цифровой преобразователь (АЦП), устройство селекции выборок (УСВ), дециматор синфазного канала, дециматор квадратурного канала и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), при этом вход АЦП соединен с выходом УПЧ сигнального канала, выход АЦП соединен со входом УСВ, один выход УСВ соединен со входом дециматора синфазного канала, второй - со входом дециматора квадратурного канала, его выход соединен со входом ЦАПа, а выход ЦАПа - со входом усилителя переменного тока, тактовый вход АЦП соединен с тактовым входом УСВ и с выходом устройства синтеза частот, частота которого равна учетверенному значению требуемой промежуточной частоты, а управляющий вход импульсного демодулятора соединен с выходом тактовой частоты УСВ.

На чертеже представлена блок-схема когерентного супергетеродинного спектрометра ЭПР.

Устройство содержит сигнальный 1 и гетеродинный 2 генераторы СВЧ, измерительный аттенюатор 3, смеситель опорного 4 и сигнального 5 каналов, циркулятор 6, измерительный резонатор 7 с элементом перестройки его резонансной частоты 8, УПЧ опорного 9 и сигнального 10 каналов, фазочастотные дискриминаторы 11 и 12, делители частоты 13 и 14, опорный генератор 15, устройство синтеза частот 16, аналого-цифровой преобразователь 17, устройство селекции выборок 18, дециматоры синфазного 19 и квадратурного 20 каналов, цифро-аналоговый преобразователь 21, усилитель переменного тока 22, импульсный демодулятор 23 и трехпозиционный переключатель 24.

Работа устройства поясняется следующим рассмотрением.

Сигнал ПЧ $s(t)$ на выходе УПЧ сигнального канала 10 при соответствующем выборе начальной фазы пропорционален

$$s(t) = I(t)\cos(\omega t) - Q(t)\sin(\omega t),$$

где

ω - промежуточная частота.

Здесь $I(t)$ (синфазный сигнал) несет информацию о сигнале поглощения ЭПР (измеряемый сигнал), а $Q(t)$ (квадратурный сигнал) - о расстройке измерительного резонатора и сигнального генератора СВЧ, который может быть использован для автоматической подстройки частоты (АПЧ).

В устройстве-прототипе для разделения компонент применялось квадратурное детектирование с помощью двух, соединенных входами аналоговых демодуляторов, фазы опорных сигналов которых различаются на $\pi/2$, а начальная фаза выбрана соответствующим образом. Для устранения нежелательных смещений и дрейфов в канале постоянного тока усиление ведется на переменном токе, для чего квадратурный сигнал подвергается импульсной модуляции до усиления и синхронной демодуляции после. Импульсная модуляция в устройстве-прототипе осуществляется с помощью фазовой модуляции гетеродинного сигнала демодулятора квадратурного канала на частоте Ω прямоугольным сигналом со скважностью 2 (меандром), изменяющим фазу на π .

Тогда, если гетеродинный сигнал на промежуточной частоте до модуляции имеет вид $s_r(t) = \sin(\omega t)$, то после импульсной фазовой модуляции ($0/\pi$) меандром частоты Ω получим

$$s_{rM}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{k\pi}{2}\right)}{\frac{k\pi}{2}} \sin(\omega t) \cos(k\Omega t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) \sin(\omega t) \cos(k\Omega t)$$

где k нумерует боковые полосы в спектре фазомодулированного колебания.

Наиболее просто схема реализуется в случае, когда частота Ω получается делением ω на целую величину m ($\Omega = \omega/m$).

Приведенная формула показывает, что отличны от нуля боковые полосы с нечетными номерами k (частоты $\Omega (m \pm 1)$, $\Omega (m \pm 3)$, $\Omega (m \pm 5)$, ..., $\Omega (m \pm k)$), а величина спектральных компонент слабо (линейно) спадает с ростом номера k . Любой аналоговый демодулятор, вследствие неидеальности, характеризуется уровнем проникновения сигнала гетеродина на выход. В тех случаях, когда гетеродинный и выходной сигналы имеют существенно различные частоты, такое проникновение не приводит к серьезным проблемам, поскольку выходной сигнал может быть подвергнут частотной фильтрации. В рассматриваемом случае в спектре гетеродинного сигнала присутствует значительная компонента непосредственно на частоте модуляции ($k=m-1$), которая, проникая на выход, существенно ограничивает чувствительность канала и сужает его динамический диапазон. Возможное решение проблемы путем компенсации проникающего сигнала на выходе демодулятора требует инъекции в выходную цепь сигнала на частоте модуляции с точно подобранными амплитудой и фазой, что сложно как схемотехнически, так и в процессе настройки. Кроме того, достижимый уровень компенсации ограничен нестабильностями, естественными для аналоговых цепей.

В предлагаемом техническом решении указанная проблема решается следующим образом.

Преобразуем аналоговый сигнал ПЧ $s(t)$ на выходе УПЧ сигнального канала 10 в цифровой, производя при помощи АЦП выборки с временным интервалом $T_s = \frac{2\pi}{4\omega}$,

где ω - промежуточная частота, т.е. на частоте $\omega_s = 4\omega$.

Значения выборок аналогового выходного сигнала УПЧ будут иметь вид

$$\begin{aligned} s_a(nT_s) &= I(nT_s) \cos(\omega nT_s) - Q(nT_s) \sin(\omega nT_s) = \\ &= I(nT_s) \cos\left(\omega n \frac{2\pi}{4\omega}\right) - Q(nT_s) \sin\left(\omega n \frac{2\pi}{4\omega}\right) = \\ &= I(nT_s) \cos\left(n \frac{\pi}{2}\right) - Q(nT_s) \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

Здесь n - порядковый номер выборки, а индекс a указывает, что помеченный сигнал - аналоговый.

Из формулы видно, что выборки с четными номерами будут содержать информацию только о синфазной компоненте, а с нечетными - только о квадратурной.

$$I(nT_s) = (-1)^{\frac{n}{2}} s_a(nT_s) = (-1)^{\frac{n}{2}} s_a(nT_s) \quad n - \text{четный,}$$

$$Q(nT_s) = (-1)^{\frac{n+1}{2}} s_a(nT_s) \quad n - \text{нечетный.}$$

Таким образом, разделив выходной поток данных АЦП на два, для четных и нечетных порядковых номеров выборок, и поочередно меняя знак выборок в соответствии с приведенными формулами, получаем оцифрованный сигнал поглощения ЭПР (синфазный сигнал), который для сужения полосы пропускания и соответствующего увеличения чувствительности можно подвергнуть децимации, и оцифрованный квадратурный сигнал, необходимый для работы системы автоподстройки частоты (АПЧ). Импульсная модуляция, эквивалентная фазовой манипуляции в устройстве-прототипе, реализуется изменением знака выборок квадратурного сигнала каждые 1 выборку, тогда частота модуляции окажется равной $\Omega = \frac{\omega_s}{2l}$, где ω_s - частота потока данных квадратурного сигнала. В результате применения описанной схемы устраняются паразитные сигналы на частоте модуляции сигнала и необходимость применения каких-либо методов их компенсации.

Функции разделения потока данных АЦП на два, управление знаками выборок и цифровая модуляция реализуются в цифровом автомате-устройстве селекции выборок (УСВ).

Модулированный цифровой поток данных квадратурного сигнала при необходимости децимируется и подается на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), частота преобразования которого выбирается существенно большей частоты модулирующего сигнала. Далее аналоговый выходной сигнал ЦАПа поступает на вход полосового усилителя переменного тока, усиливающего сигнал ошибки по частоте и, одновременно, устраняющего нежелательные спектральные компоненты выходного сигнала ЦАПа. Усиленный сигнал подается на вход импульсного демодулятора, на управляющий вход с УСВ которого поступает меандр на частоте Ω , приводя к формированию на выходе демодулятора необходимого сигнала ошибки.

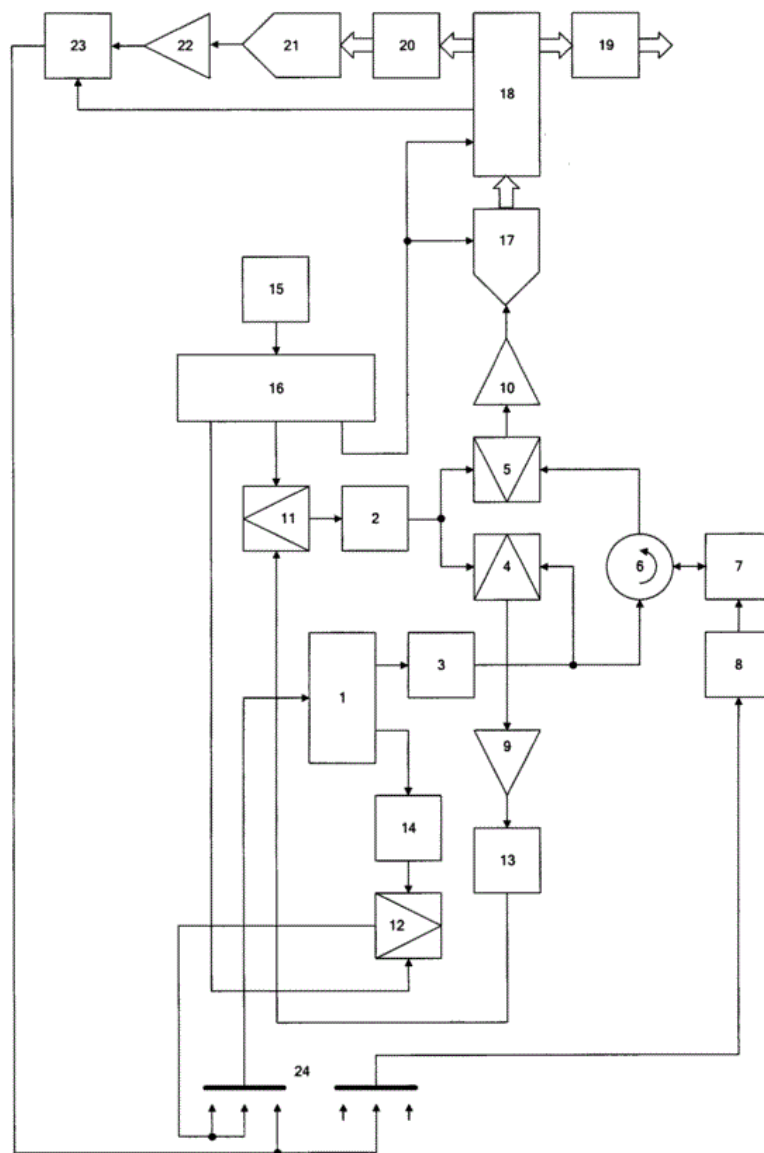
Таким образом, предлагаемое техническое решение значительно упрощает аппаратную часть устройства за счет замены аналоговых устройств цифровыми алгоритмами, исключает необходимость настройки после изготовления, увеличивает надежность и снижает цену при одновременном уменьшении остаточной ошибки системы автоподстройки частоты, приводя к увеличению чувствительности спектрометра.

Формула изобретения

Когерентный супергетеродинный спектрометр электронного парамагнитного резонанса, включающий сигнальный и гетеродинный генераторы СВЧ, смесители опорного и сигнального каналов, циркулятор с измерительным резонатором и элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, измерительный аттенуатор, усилители промежуточной частоты (УПЧ) опорного и сигнального каналов, два фазочастотных дискриминатора с фильтрами на выходах, два делителя частоты, опорный генератор, устройство синтеза частот, усилитель переменного тока, импульсный демодулятор с фильтром на выходе, и переключатель режимов работ, при этом основной выход сигнального генератора соединен со входом измерительного аттенуатора, а его выход соединен с первым плечом циркулятора, и сигнальным входом смесителя опорного канала, выход гетеродинного генератора соединен с гетеродинным входом смесителя опорного канала и с гетеродинным входом смесителя сигнального канала, второе плечо циркулятора соединено с измерительным резонатором, снабженным элементом перестройки его резонансной частоты, третье плечо циркулятора соединено со входом смесителя сигнального канала, а его выход - со входом УПЧ сигнального канала, опорный вход первого фазочастотного дискриминатора соединен с выходом устройства синтеза частот, причем величина частоты на нем равна требуемой промежуточной частоте, деленной на коэффициент деления первого делителя частоты, а фаза регулируется, выход смесителя опорного канала соединен со входом усилителя промежуточной частоты, выполненного в виде нормирующего усилителя формирователя напряжения, а его выход соединен со входом первого делителя частоты, выход которого соединен со вторым входом первого фазочастотного дискриминатора, вспомогательный выход сигнального генератора соединен с делителем частоты, выход которого соединен с одним из входов второго фазочастотного дискриминатора, второй вход которого соединен с выходом устройства синтеза частот, выход первого фазочастотного дискриминатора соединен с управляющим электродом гетеродинного генератора, выход второго фазочастотного дискриминатора соединен с двумя контактами первой группы трехпозиционного переключателя, общий контакт которой соединен с управляющим электродом сигнального генератора, общий контакт второй группы соединен с элементом перестройки резонансной частоты измерительного резонатора, выход опорного генератора соединен со входом устройства синтеза частот, выход усилителя переменного тока соединен со входом импульсного демодулятора, а выход через фильтр соединен с контактами в обеих группах трехпозиционного переключателя, отличающийся тем, что он дополнительно содержит аналого-цифровой преобразователь (АЦП), устройство селекции выборок (УСВ), дециматор синфазного канала, дециматор квадратурного канала и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), при этом вход АЦП соединен с выходом УПЧ сигнального канала, выход АЦП соединен со входом УСВ, один выход УСВ соединен со входом дециматора синфазного канала, второй - со входом дециматора квадратурного канала, его выход соединен со входом ЦАПа, а выход ЦАПа - со входом усилителя переменного тока, тактовый вход АЦП соединен с тактовым входом УСВ и с выходом устройства синтеза частот, частота которого равна учетверенному значению

требуемой промежуточной частоты, а управляющий вход импульсного демодулятора соединен с выходом тактовой частоты УСВ.

**Когерентный супергетеродинный
спектрометр электронного
парамагнитного резонанса**



ИЗВЕЩЕНИЯ

ММ4А Досрочное прекращение действия патента из-за неуплаты в установленный срок пошлины за поддержание патента в силе

Дата прекращения действия патента: **24.11.2017**

Дата внесения записи в Государственный реестр: **22.08.2018**

Дата публикации и номер бюллетеня: **22.08.2018** Бюл. №24

