



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 96877

(13) C2

(51) МПК (2011.01)

G04F 5/00

H01S 1/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СПОСІБ ВІДТВОРЕННЯ ЕТАЛОННОЇ ЧАСТОТИ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

1

(21) а201009791

(22) 06.08.2010

(24) 12.12.2011

(46) 12.12.2011, Бюл.№ 23, 2011 р.

(72) ЛЕНОВЕНКО АНАТОЛІЙ МИХАЙЛОВИЧ, ПА-
РАКУДА ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ, КУЗІЙ АНДРІЙ
ІВАНОВИЧ, ІВАНОВА КАТЕРИНА ПЕТРІВНА, ПА-
ВЛИК БОГДАН ВАСИЛЬОВИЧ, КОВАЛЬЧУК НАДІЯ
ОРЕСТІВНА, ГРИГОРЕНКО ВАДИМ ВАЛЕНТИ-
НОВИЧ(73) ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИ-
ТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА

(56) SU 1258212 A1, 10.05.1996

RU 2177194 C2, 20.12.2001

RU 21771195 C2, 20.12.2001

US 3792368, 12.02.1974

US 4706042, 11.10.1987

GB 2044521 A, 15.10.1980

SU 1115567 A1, 10.06.2005

RU 2148881 C1, 10.05.2000

(57) 1. Спосіб відтворення еталонної частоти, який включає детектування сигналу резонансної частоти при термостабілізації чутливого елемента, обробку частотних сигналів та відтворення еталонної частоти, який **відрізняється** тим, що шляхом частотної модуляції детектують сигнал від чутливого елемента, в якому має місце ядерний квадрупольний резонанс, резонансна частота якого є функцією температури, синхронізують його шляхом фазової автопідстройки з частотним сигналом генератора-детектора та відтворюють еталонну частоту, а термостабілізацію чутливого елемента здійснюють в одній із температурних реперних точок міжнародної температурної шкали МТШ-90.

2. Пристрій для відтворення еталонної частоти, який містить чутливий елемент, схему обробки частотних сигналів та відтворення еталонної частоти, термостабілізатор, кварцовий генератор,

2

частотний компаратор, програмований таймер, який **відрізняється** тим, що як чутливий елемент використаний кристалічний матеріал, в якому має місце ядерний квадрупольний резонанс, який розташований в ампулі реперної температурної точки з електронною схемою керування та розміщений в котушці індуктивності резонансного контура, що з'єднаний з генератором-детектором ядерного квадрупольного резонансу, низькочастотний вихід якого відповідно з'єднаний з входами синхронного детектора першої похідної та синхронного детектора другої похідної, синтезатор модуляційних сигналів, вихід "А" якого з'єднаний з опорним входом синхронного детектора другої похідної, вихід якого з'єднаний з входом порогового компаратора, вихід якого з'єднаний з першим входом схеми співпадіння (кон'юнктора), другий вхід якої з'єднаний з виходом схеми керування термостатом, а його вихід з входом аналогового ключа, вихід "В" синтезатора модуляційних сигналів з'єднаний з опорним входом синхронного детектора першої похідної, вихід якого з'єднаний з одним із входів аналогового ключа, другий вхід якого з'єднаний з виходом "С" синтезатора модуляційних сигналів, вихід "D" якого через RLC-ланку з'єднаний з одним із входів резонансного контура, другий вхід якого через RL-ланку та аналоговий інтегратор з'єднаний з аналоговим ключем, а другий високочастотний вихід генератора детектора ядерного квадрупольного резонансу з'єднаний з першим входом кон'юнктора тракту інформаційної частоти, другий вхід якого з'єднаний з виходом порогового компаратора, третій вхід - з виходом подільника частоти, а вихід частотного компаратора під'єднаний до керуючого входу кварцового генератора і схеми керування реперною температурною точкою плавлення галію, вихід кварцового генератора є виходом пристрою.

Винахід належить до приладобудування, зокрема до стандартів частоти, які призначені для відтворення високостабільних частот, й може бути використаний у вимірювальній техніці, метрології, навігації тощо.

Стандарти частоти діляться на кварцові та квантові, при цьому квантові стандарти частоти в свою чергу поділяються на активні та пасивні.

Відомий стандарт частоти кварцовий (1), який містить опорний кварцовий генератор, побудований на високочастотному кварцовому резонаторі,

(19) UA (11) 96877 (13) C2

який включений в коло зворотного зв'язку автогенератора, схему автоматичного регулювання амплітуди, синтезатор, вузькосмуговий кварцовий фільтр. Кварцовий генератор із системою автоматизованого регулювання амплітуди і буферним каскадом розміщені в термостаті. Для покращення відношення сигнал/шум використаний вузькосмуговий кварцовий фільтр.

Спосіб, який реалізується за допомогою вищезгаданого пристрою, включає детектування сигналу резонансної частоти кварцового резонатора при термостабілізації, обробку частотних сигналів та відтворення еталонної частоти.

Основним недоліком способу є неможливість забезпечення довготривалої стабільності відтворення еталонної частоти, викликані старінням кварцового резонатора.

Відомий атомний стандарт частоти активного типу (2), який містить утворену стінками мікрохвильову камеру, всередині якої розміщені об'ємний резонатор та колба, яка призначена для накопичування середовища, здатного до вимушеного випромінювання, за який використано радіочастотний газовий розряд у молекулярному водні, що виробляє атомний водень. Колба виконана у вигляді пустотілого сапфірового циліндра, закритого із двох боків титановими кришками з поліфторетиловим покриттям внутрішньої поверхні. Такий прилад називають водневим мазером.

Основним недоліком вищезгаданого атомного стандарту частоти є складність конструкції, великі габарити та маса, висока собівартість, велика потужність споживання, а також обмежені експлуатаційні можливості.

Відомий спосіб відтворення еталонної частоти активного типу (3) на основі водневого мазера з модуляцією частоти резонатора, у якому модулятор переключає резонансну частоту між двома значеннями, відповідно більшим та меншим від власної частоти вимушеного випромінювання середовища в резонаторі, за допомогою прикладення напруги прямокутної форми до схеми налаштування варактора, який з'єднаний із мікрохвильовим резонатором. Рівень вихідного випромінювання мазера модулюється, коли середнє значення частоти резонатора відрізняється від власної частоти вимушеного випромінювання середовища в резонаторі. Після детектування огинаючої на виході мікрохвильового приймача та синхронного детектування, отримують сигнал похибки, який використовують для керування частотою резонатора.

У зв'язку з тим що в сигналі обробки присутні амплітудні та фазові шуми, внесені схемою настройки резонатора, даний спосіб має недостатню точність та стабільність відтворення при великих масогабаритах.

Відомий водневий стандарт частоти (4), який включає водневий генератор, кварцовий генератор, систему фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) кварцового генератора по сигналу водневого генератора. Блок автоматичної настройки резонатора через ключовий пристрій підключений до виходу фазового детектора системи ФАПЧ і містить послідовно з'єднані селективний фільтр, аналого-цифровий перетворювач, цифровий син-

хронний детектор і цифро-аналоговий перетворювач.

Даний стандарт частоти в порівнянні з активними стандартами частоти є менший за розмірами та масою, але, як і попередній, споживає велику потужність та має нижчу за нього стабільність.

Найбільш близьким за технічною суттю до способу відтворення еталонної частоти та пристрою для його реалізації, що пропонується, який прийнятий за прототип, є спосіб відтворення еталонної частоти з пасивним репером (5), у якому спектральна лінія атомів використовується для автопідстройки по ній частоти допоміжного генератора, а квантовий репер працює як дискримінатор, який визначає величину і знак відхилення частоти допоміжного генератора від її номінального значення, і усуває це відхилення.

Даний спосіб дозволяє, шляхом підстройки частоти резонатора на вершину спектральної лінії, усунути вплив повільних флуктуацій частоти резонатора дискримінатора на лінію випромінювання, що приводить до часткового підвищення точності відтворення еталонної частоти, але він не може забезпечити довготривалої стабільності частоти і потребує калібровки.

В основу винаходу поставлена задача вдосконалити спосіб відтворення реперної еталонної частоти, використанням явища ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР), яке спостерігається в кристалах, що містять у своєму складі ядра з електричним квадрупольним моментом. Резонансну частоту ЯКР стабілізують шляхом термостабілізації чутливого елемента в одній із реперних точок міжнародної температурної шкали МТШ-90 в процесі обробки частотних сигналів, чим забезпечують довгострокову стабільність та високу точність відтворення еталонної частоти, незалежно від умов експлуатації.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі відтворення еталонної частоти, який включає детектування сигналу резонансної частоти при термостабілізації, обробку частотних сигналів та відтворення еталонної частоти, згідно з винаходом, шляхом частотної модуляції детектують сигнал від чутливого елемента, в якому має місце фізичне явище ядерного квадрупольного резонансу, резонансна частота якого є функцією температури, синхронізують її шляхом фазової автопідстройки з частотним сигналом генератора-детектора та відтворюють еталонну частоту, а термостабілізацію чутливого елемента здійснюють в одній із температурних реперних точок міжнародної температурної шкали МТШ-90.

За рахунок того, що частота ЯКР є функцією температури і визначається параметрами кристалічної ґратниці чутливого елемента, тобто фундаментальними квантовими константами на молекулярному рівні, які не залежать від зовнішніх факторів, а також за рахунок термостабілізації чутливого елемента в одній із температурних реперних точок міжнародної температурної шкали МТШ-90, де підтримують абсолютне значення температури з похибкою $\sim 1 \cdot 10^{-4} \text{ K}$, забезпечується висока точність відтворення еталонної частоти та довгострокова її стабільність, незалежно від умов

експлуатації, в результаті відпадає потреба в періодичному калібруванні та регулюванні.

В основу винаходу поставлена задача - удосконалити пристрій для відтворення реперної еталонної частоти, який реалізує вищеописаний спосіб, шляхом використання як резонатора чутливого елемента, в якому має місце явище ядерного квадрупольного резонансу, та розміщення його в автоматизованій портативній реперній температурній точці, що дозволить виключити залежність резонансної частоти від впливу температури та старіння чутливого елемента.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої для відтворення еталонної частоти, який містить чутливий елемент, схему обробки частотних сигналів та відтворення еталонної частоти, термостабілізатор, згідно з винаходом, як чутливий елемент використано елемент, в якому має місце явище ядерного квадрупольного резонансу, який розташований в ампулі реперної температурної точки з електронною схемою керування та розміщений в котушці індуктивності резонансного контура, який з'єднаний з генератором-детектором ядерного квадрупольного резонансу, один вихід якого відповідно з'єднаний з входами синхронного детектора першої похідної та синхронного детектора другої похідної, синтезатор модуляційних сигналів, вихід "А" якого з'єднаний з другим входом синхронного детектора другої похідної, вихід якого з'єднаний з входом порогового компаратора, вихід якого з'єднаний з першим входом схеми співпадіння (кон'юнктора), другий вхід якої з'єднаний з виходом схеми керування термостатом, а його вихід з входом аналогового ключа, вихід "В" синтезатора модуляційних сигналів з'єднаний з опорним входом синхронного детектора першої похідної, вихід якого з'єднаний з одним із входів аналогового ключа, другий вхід якого з'єднаний з виходом "С" синтезатора модуляційних сигналів, вихід "D" якого з допомогою С, R, L ланки з'єднаний з одним із входів резонансного контура, другий вхід якого через R, L ланку та аналоговий інтегратор з'єднаний з аналоговим ключем, а другий вихід генератора-детектора ядерного квадрупольного резонансу з'єднаний з першим входом кон'юнктора тракту інформаційної частоти, другий вхід якого з'єднаний з виходом порогового компаратора, третій вхід - з виходом подільника частоти, а вихід частотного компаратора під'єднаний до керуючого входу кварцового генератора і схеми керування реперною температурною точкою плавлення галію, вихід кварцового генератора є виходом пристрою.

Використання ядерно-квадрупольного резонансу та розташування чутливого елемента в ампулі реперної температурної точки з електронною схемою керування, дозволило виключити залежність резонансної частоти від впливу температури та старіння чутливого елемента, забезпечивши високу точність відтворення еталонної частоти та довгострокову її стабільність.

На Фіг.1 зображено блок-схему пристрою для відтворення еталонної частоти. На Фіг.2 приведено форми електричних сигналів, які пояснюють реалізацію способу та принцип роботи пристрою.

Пристрій для відтворення еталонної частоти (Фіг.1) містить автоматизовану реперну температурну точку 1, наприклад, плавлення галію, з електронною схемою керування 2 та ядерно-квадрупольний резонансний вимірювальний перетворювач, який включає резонансний контур 3 утворений котушкою індуктивності L_k з термочутливим елементом на основі $KClO_3$ і двома варикапами VD1 і VD2, який з'єднаний з генератором детектором ядерного квадрупольного резонансу 4, один вихід якого відповідно з'єднаний з входами синхронного детектора першої похідної 5 та синхронного детектора другої похідної 6, синтезатор модуляційних сигналів 7, вихід "А" якого з'єднаний з другим входом синхронного детектора другої похідної 6, вихід якого з'єднаний з входом порогового компаратора 8, а його вихід з'єднаний з першим входом кон'юнктора 9, другий вхід якого з'єднаний з виходом схеми керування 2, а його вихід з входом аналогового ключа 10, вихід "В" синтезатора модуляційних сигналів 7 з'єднаний з другим входом синхронного детектора першої похідної 5, вихід якого з'єднаний з керуючим входом аналогового ключа 10, другий вхід якого з'єднаний з виходом "С" синтезатора модуляційних сигналів 7, вихід "D" якого через С, R, L ланку з'єднаний з одним із входів резонансного контура 3, другий вхід якого через R, L ланку та аналоговий інтегратор 11 з'єднаний з аналоговим ключем 10, а другий високочастотний вихід генератора-детектора ядерного квадрупольного резонансу 4 з'єднаний з першим входом кон'юнктора тракту інформаційної частоти 12, а другий вхід якого з'єднаний з виходом порогового компаратора 8, третій вхід - з виходом подільника частоти 18, що формує одnoseкундний строб-імпульс для частотного компаратора 15, а вихід частотного компаратора 15 під'єднаний до керуючого входу кварцового генератора 17 і схеми керування реперною температурною точкою плавлення галію 2, вихід кварцового генератора 17 є виходом пристрою.

Синтезатор модуляційних сигналів 7 формує наступні сигнали:

по виходу "А" формується опорний сигнал $f_{on}=f_M \approx 500$ Гц, ортогональний до модуляційної частоти f_M для синхронного детектора першої похідної;

по виходу "В" формується опорний низькочастотний імпульсний сигнал, рівний $f_{on}=2f_M \approx 1000$ Гц, ортогональний до модуляційної частоти f_M для синхронного детектора другої похідної;

по виходу "С" - низькочастотний імпульсний двополярний сигнал, який спільно з інтегратором 11 формує пілкоподібну напругу для розгортки несучої частоти генератора з частотою $\approx 0,5$ Гц;

по виходу "D" - гармонічний модуляційний сигнал частотою $f_M \approx 500$ Гц.

Чутливий елемент 13 детектора ЯКР розміщений в ампулі 14 реперної температурної точки плавлення галію 1.

На Фіг.2 приведено: а - форма резонансної характеристики ядерно-квадрупольного резонансу; б - напруга на виході синхронного детектора першої похідної 5; с - напруга на виході синхронного детектора другої похідної 6; d - гармонічний модуляцій-

ний сигнал f_m ; e - низькочастотний сигнал ЯКР на виході генератора-детектора ядерного квадрупольного резонансу 4; g - поріг включення порогового компаратора 8.

Спосіб відтворення еталонної частоти здійснюють наступним чином.

Після включення живлення схема керування 2 (Фіг.1) автоматизованої реперної температурної точки плавлення галію 1 виводить останню в робочий режим, при якому галій у камері плавлення переходить у стан розтопленого і в ампулі 14 встановлюється температура 29,7646 °C, а на вхід кон'юктора 9 надходить сигнал готовності у вигляді постійної напруги (логічна "1"). Паралельно вводиться в робочий режим ядерно-квадрупольний вимірювальний перетворювач.

Частота генератора-детектора ядерно-квадрупольного резонансу 4 встановлюється у межах 28063514 Гц з точністю ± 3 кГц, обумовленою нестабільністю параметрів резонансного контура 3. Одночасно частота настройки генератора-детектора ядерно-квадрупольного резонансу 4 повільно змінюється (з швидкістю ≈ 1 кГц/сек) у цих межах сигналом з виходу "С" синтезатора модуляційних сигналів 7, який через замкнений контакт аналогового ключа 10 та аналоговий інтегратор 11 подається на варикап VD2 резонансного контура 3. Паралельно частота генератора-детектора ядерно-квадрупольного резонансу 4 модулюється низькочастотним гармонічним сигналом з виходу "D" синтезатора модуляційних сигналів 7, який з'єднаний з варикапом VD1 резонансного контура 3.

Так як чутливий елемент 13 генератора-детектора ядерно-квадрупольного резонансу 4 термостатований в ампулі 14 автоматизованої реперної температурної точки 1 при температурі 29,7646 °C, центральна частота f_0 резонансної лінії ядерно-квадрупольного резонансу для KClO_3 дорівнює $f_p = 28063514$ Гц. Як тільки несуча частота генератора-детектора ядерно-квадрупольного резонансу 4 попадає в смугу резонансної лінії (сигнал а, Фіг.2), на виході синхронного детектора другої похідної 6 з'являється напруга (сигнал с, Фіг.2), яка викликає спрацювання порогового компаратора 8, по сигналу якого через кон'юктор 9 перемикається аналоговий ключ 10, при цьому розгортка частоти відключається, а на вхід аналогового інтегратора 11 подається сигнал з виходу синхронного детектора першої похідної 5 (сигнал b, Фіг.2), який забезпечує точну прив'язку несучої частоти генератора-детектора ядерно-квадрупольного резонансу 4 до центру резонансної лінії ЯКР. В цей же час від порогового компаратора 8 на другий вхід кон'юктора надходить сигнал логічної "1", а на третій вхід надходить односекундний строб-імпульс, сформований подільником частоти 18 від вихідного кварцового генератора 17. В результаті на виході кон'юктора 12 формується односекундний радіоімпульс з частотою заповнення $f_{ЯКР}$, який надходить на вхід частотного компаратора 15, де порівнюється з частотою ЯКР при температурі 29,7646 °C. Різницевий код з допомогою цифрового потенціометра калібрує вихідний кварцовий генератор 17, частота якого є вихідним сиг-

налом пристрою. Після калібрування кварцового генератора 17, програмований таймер 19 переключає вихід частотного компаратора 15 на схему керування реперною температурною точкою плавлення галію 2 і підтримує температуру розтопленого галію в камері плавлення і ампулі реперної точки 14.

Частотний компаратор являє собою реверсивний лічильник з попереднім записом еталонної частоти ядерного квадрупольного резонансу.

Генератор-детектор ядерного квадрупольного резонансу являє собою високочастотний стабілізований по амплітуді і перестроюваний по частоті генератор, частота якого модулюється низькочастотним гармонічним сигналом. Гармонічна форма модуляційної напруги вибрана з метою ліквідації перехідних процесів, що виникають при імпульсній модуляції. Девіація частоти несучої і частота низькочастотної модуляції дорівнюють половині ширини резонансної характеристики ЯКР в KClO_3 , тобто $f_m \approx 500$ Гц. При таких параметрах модуляційних сигналів одержується максимальне значення першої похідної від резонансної лінії ЯКР, за допомогою якої виконується синхронізація частоти генератора-детектора ядерно-квадрупольного резонансу 4 з частотою ядерно-квадрупольного резонансу.

Крім того, для такої частоти модуляції при проходженні через резонансну характеристику ЯКР порушуються умови квазістаціонарності і гармонічний сигнал на виході детектора буде зсунутий по фазі на кут порядку 45° (узагальнена розстройка $\xi \approx 1$) відносно модуляційної напруги; у той час як сигнал паразитної модуляції буде синфазний з модуляційною напругою, так як для резонансної характеристики генератора-детектора умови квазістаціонарності виконуються ($\xi \approx 0$). Цей факт використовується для ліквідації впливу паразитної модуляції на точність прив'язки частоти генератора до резонансної лінії ЯКР.

Сигнал ядерного квадрупольного резонансу після детектування надходить на входи синхронних детекторів у вигляді гармонічної функції e (Фіг.2) зсунутої по фазі відносно модуляційного на кут порядку 45°. Цей сигнал можна розкласти на два, один із яких ортогональний до сигналу модуляції, а другий - синфазний. Нагадаємо, що сигнал паразитної модуляції синфазний з модуляційним. Якщо на синхронний детектор подати опорний сигнал ортогональний до модуляційного, то на виході детектується чиста перша похідна від резонансної характеристики ЯКР без паразитного сигналу. Такий сигнал є ідеальним для реалізації схеми прив'язки і слідування за частотою ЯКР. Аналогічно формується чиста друга похідна від резонансної характеристики ЯКР, яка використовується як службовий сигнал в схемі автоматики.

Отже, у запропонованому пристрої, на відміну від відомих аналогів щодо відтворення еталонних частот, вирішується проблема довгострокової стабільності реперної частоти при малих масогабаритах конструкції і малому споживанню енергії, що підтверджує отримання передбачуваного технічного результату.

Джерела інформації:

