

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского**

ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

Учебное пособие

Рекомендовано Учёным советом радиофизического факультета для студентов ННГУ, специализирующихся в лаборатории “Лаборатория перспективных квантовых стандартов частоты и систем точного времени” в рамках Программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030”.

Нижний Новгород
2023

УДК 621.391.822
ББК 32.841
К52

Рецензенты: кандидат физ.-мат. наук, доцент **С.Ю. Медведев**,
кандидат физ.-мат. наук **В.В. Пархачёв**

К52 ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ. Авторы: Ключев А.В., Мишагин К.Г., Поляков В.А., Таланова А.А., Якимов А.В.: Учебное пособие. – Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2023. – 43 с.

Кратко описаны основные типы квантовых стандартов частоты. Учебное пособие предназначено для студентов, специализирующихся в лаборатории “Лаборатория перспективных квантовых стандартов частоты и систем точного времени”. Оно также будет полезно для студентов радиофизического факультета ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки 03.03.03 и 03.04.03 “Радиофизика” (бакалавриат и магистратура), 02.03.02 “Фундаментальная информатика и информационные технологии” (бакалавриат), а также специальности 10.05.02 “Информационная безопасность телекоммуникационных систем”.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Программа стратегического академического лидерства “Приоритет 2030”, Стратегический проект “Фундаментальные основы технологий будущего”, задача 2.

Ответственный за выпуск:
заместитель председателя методической комиссии радиофизического
факультета ННГУ, д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**.

УДК 621.391.822
ББК 32.841

© **А.В. Ключев, К.Г. Мишагин, В.А. Поляков,
А.А. Таланова, А.В. Якимов, 2023**
© **Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2023**

Содержание

Введение	4
1. Кварцевые генераторы.....	4
2. Квантовые стандарты частоты.....	7
3. Рубидиевые стандарты частоты	14
4. Цезиевые стандарты частоты	18
5. Водородные стандарты частоты	27
5.1. Водородный генератор.....	28
5.2 Блок автоматической подстройки частоты.....	33
5.3 Блок автоматической настройки резонатора.....	36
5.4 Нестабильность частоты водородного генератора.....	38
6. Заключение	41
Список литературы	42

Введение

Современные области применения квантовых стандартов частоты – это спутниковая навигация, национальные службы времени и определения параметров вращения Земли, тактовая синхронизация телекоммуникационных сетей связи, синхронизация времени в энергетических системах, в банковской сфере и других отраслях, а также научные исследования, в том числе такие фундаментальные, как уточнение физических постоянных, проверка теории относительности, астрофизические исследования, основанные на радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой [1, 2].

Прежде чем говорить о стандартах частоты и времени, следует заметить, что работа часов, как правило, основывается на использовании генераторов, формирующих периодический сигнал заданной частоты. Стабильность этой частоты и результирующее время отсчёта зависят от основного физического принципа работы, свойства устройства могут сильно различаться между различными классами генераторов. Также отметим, что все квантовые стандарты частоты, по крайней мере радиодиапазона, для формирования выходного сигнала используют в своем составе кварцевый генератор, стабилизированный относительно частоты квантового перехода. Кроме этого, в некоторых приложениях кварцевые генераторы сами используются в качестве стандартов частоты. Поэтому пособие начинается с описания и классификации современных кварцевых генераторов.

1. Кварцевые генераторы

Кварцевые генераторы являются самыми распространёнными и наиболее доступными источниками синусоидальных сигналов [2]. Данные генераторы основаны на схеме обычного колебательного контура, RC- или LC-цепей. Кварцевые генераторы используются во множестве электронных приборов, в системах связи и спутниковой навигации.

Кварц является пьезоэлектрическим материалом и способен генерировать электричество под действием механических сил, что называется прямым пьезоэлектрическим эффектом. Существует также и обратный пьезоэлектрический эффект, в котором под действием приложенного электрического поля возникают механические деформации материала. Кварцевые генераторы имеют более высокую добротность (т. е. отношение резонансной частоты к полосе пропускания) и лучшую температурную стабильность, чем простейшие RC- и LC-цепи. В других типах пьезоэлектрических резонаторов используется механизм поверхностных акустических волн (ПАВ), согласно которому сигналы распространяются по поверхности кристаллического материала, вместо традиционного механизма объемных акустических волн (ОАВ), при котором сигналы распространяются через кристалл.

Существуют кристаллические резонаторы, охватывающие частоты от 1 кГц до более 200 МГц. В низкочастотной области, наручные часы и часы реального времени работают на частоте 32,768 кГц и производных от нее, полученных удвоением частоты. Обычные резонаторы на механизме ПАВ работают в диапазоне частот от 80 кГц до 200 МГц. Частоты устройств с ОАВ варьируются от более 50 МГц до нижнего ГГц-диапазона [2].

Материал кристалла кварца состоит из диоксида кремния и может встречаться в природе, но также может быть выращен и синтетически. Генераторы изготавливаются непосредственно из кристаллов разнообразной формы. Форма, размер и ориентация внутри кристаллической структуры определяют моду колебаний, резонансную частоту и свойства осциллятора. Напряжение, приложенное к кристаллу, заставляет его колебаться и выдавать стабильный сигнал, зависящий от формы кристалла. Процесс создания кварцевого генератора очень сложен и требует выбора материала, резки, полировки, монтажа электрических контактов и герметизацию в вакуумной

камере. Кристаллы установлены на контактах, которые проходят через вакуумную камеру к электродам, нанесенным на сам кристалл [2].

Качество кварцевого генератора определяется его стабильностью частоты, сроком службы и устойчивостью к влиянию окружающей среды. Абсолютная точность частоты кварцевого генератора составляет от 10^{-6} до 10^{-7} с учетом таких воздействий окружающей среды, как температура, механический удар и старение. Нестабильность частоты может варьироваться от 10^{-10} до 10^{-13} на коротких интервалах времени в зависимости от защищённости кристалла от воздействий окружающей среды. Под старением обычно понимается медленное изменение частоты за период времени, связанный с долговременными изменениями в самом кристалле, или такими эффектами, как загрязнение внутри вакуумной камеры, медленные утечки, монтаж и напряжение электродов, снимающееся со временем, а также изменение атмосферного давления. Окружающая среда оказывает прямое влияние на кристалл: температурное и механическое воздействие, излучение, переворачивание кристалла (опрокидывание), изменение электромагнитного поля, нестабильное напряжение питания.

Тип кварцевого генератора определяется видом огранки кристалла и способом уменьшения воздействия окружающей среды на кристалл. Существуют три наиболее распространённые конфигурации: кварцевый генератор комнатной температуры (RTXO – room-temperature crystal oscillator), кварцевый генератор с температурной компенсацией (TCXO – temperature-compensated crystal oscillator) и кварцевый генератор с термоуправлением (OCXO). Конфигурация RTXO обычно использует герметично закрытый корпус с кристаллом и отдельными компонентами схемы генератора. TCXO включает в себя, кроме кварца и элементов схемы генератора, компоненты для компенсации температуры. В OCXO ко всему прочему добавляется система автоматического управления температурой, включающая нагревательные

элементы. Причём термочувствительные компоненты заключаются в термоизолированный корпус.

Повышенный спрос на мелкомасштабную электронику для сотовых телефонов, портативной электроники и миниатюрных портативных компьютеров привёл к разработке малогабаритных кварцевых генераторов—и MEMS-генераторов, изготовленных из кремния (MEMS – micro electro-mechanical system). Колебания резонатора MEMS основаны на электростатических движущих силах, а не на пьезоэлектрических свойствах. Компоненты MEMS изготавливаются из кремния с помощью микрообработки. Они изготавливаются в различных сложных формах, таких как гребёнки, переключки, диски и т.п., окружённые электродами с преобразовательными промежутками менее 1 мкм. Все кремниевые резонаторы MEMS являются очень малогабаритными и прочными. Они предназначены для использования в интегральных схемах на более высоких частотах, по сравнению с обычными кварцевыми генераторами [2].

2. Квантовые стандарты частоты

Квантовые стандарты частоты — устройства, в которых для точного измерения частоты колебаний, или для генерирования колебаний с весьма стабильной частотой, используются квантовые переходы частиц (атомов, молекул, ионов) из одного энергетического состояния в другое [1].

Квантовые системы для измерения частоты и времени можно разделить на пассивные и активные (пассивные и активные стандарты частоты). В пассивных квантовых стандартах измеряемая частота колебаний внешнего генератора сравнивается с частотой колебаний, соответствующих определённому квантовому переходу выбранных атомов, то есть с частотой спектральной линии. Используют узкие спектральные линии, частота и ширина которых очень мало зависят от внешних воздействий. Чтобы ослабить влияние соударений атомов и молекул, понижают давление газа и используют

направленные потоки атомов и молекул. Пассивные квантовые стандарты частоты с направленными потоками атомов или молекул называют атомно-лучевыми стандартами или атомно-лучевыми трубками. В активных стандартах частоты квантовые переходы атомов и молекул непосредственно приводят к излучению электромагнитных волн, частота которых служит стандартом или опорной частотой [1].

Наиболее распространенными источниками стабильных синусоидальных сигналов радиодиапазона являются кварцевые генераторы, а также цезиевые, рубидиевые атомные часы и водородные стандарты частоты (водородные мазеры) [2]. На рис. 1. представлены зависимости характеристики нестабильности частоты некоторых перечисленных устройств от интервала времени измерения. Здесь по вертикальной оси отложена, так называемая, девиация Аллана, – двухвыборочная дисперсия, которая является мерой нестабильности частоты генераторов [2].

Традиционно атомные стандарты частоты являются приборами пассивного типа. Типичная блок-схема атомного стандарта представлена на рис. 2.

Физическая часть пассивного стандарта, генерирующая точный тактовый сигнал, включает в себя автогенератор для генерации сигнала опроса, соответствующего атомному переходу, и создания стабильного выходного сигнала, синхронизированного с ответом на этот сигнал. Сигнал опроса генерируется автогенератором, в качестве которого, как правило, используется кварцевый генератор с заданной частотой. Выбор или разработка гетеродина/локального генератора является важной задачей, которая влияет на метрологические характеристики всего устройства [2].

Основной принцип работы стандартов частоты пассивного типа заключается в когерентном возбуждении переходов между двумя энергетическими уровнями в выбранном атоме и дальнейшем детектировании

произошедшего перехода. Частота атомного перехода определяется следующим образом [2]:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad (2.1)$$

где E_1 и E_2 – энергетические уровни атома, h – постоянная Планка.

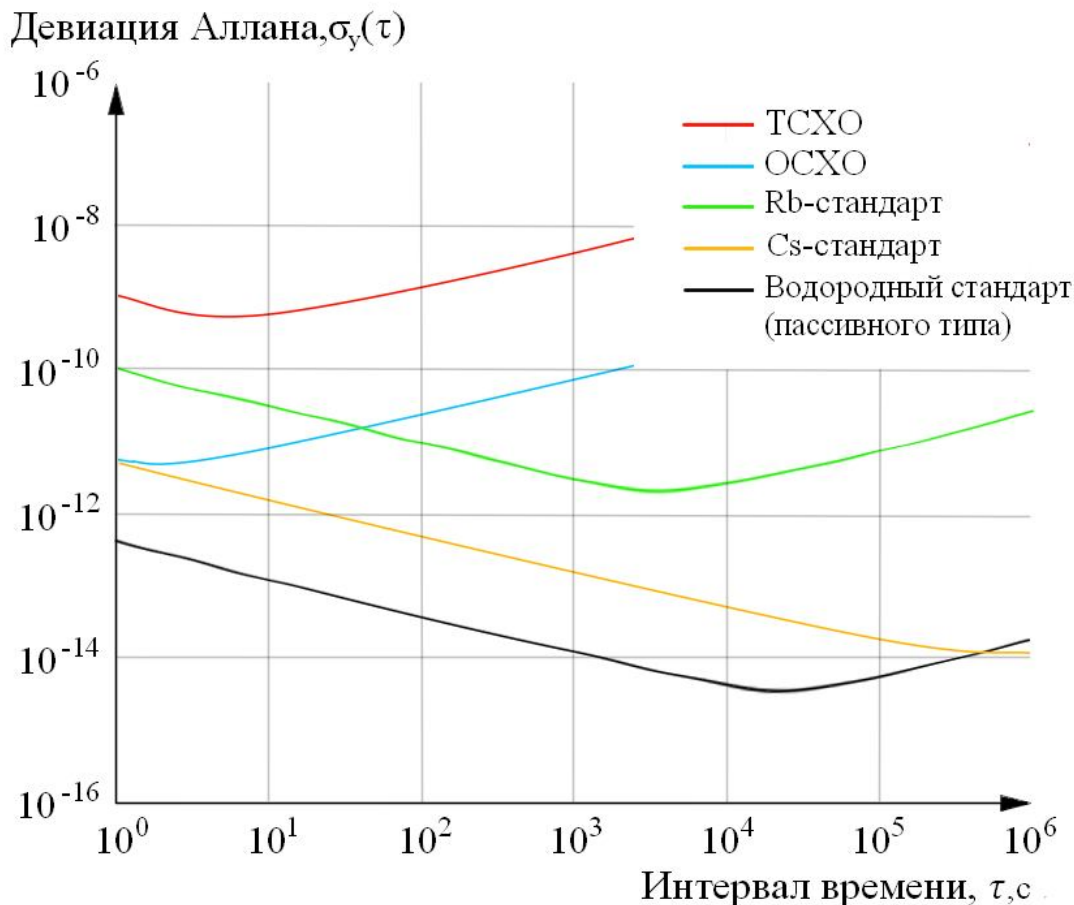


Рис. 1. Нестабильность частоты различных источников. Здесь ТСХО – кварцевый генератор с температурной компенсацией, ОСХО – кварцевый генератор с термоуправлением

Важной характеристикой выбранного перехода является добротность спектральной линии:

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu}, \quad (2.2)$$

где $\Delta\nu$ – ширина спектральной линии. Ширина спектральной линии зависит в основном от времени взаимодействия атома или молекулы с полем τ , $\Delta\nu \sim 1/\tau$. В атомных стандартах время взаимодействия составляет от 1 мс в рубидиевых и цезиевых часах до около 1 с в водородных.



Рис. 2. Блок-схема атомного стандарта

Изменение энергии атома может происходить в следующих процессах.

1. Поглощение. Атом поглощает падающий фотон с энергией $h\nu$ и переходит на более высокий уровень.
2. Индуцированное излучение. При облучении электромагнитным полем, частота колебаний которого совпадает с частотой перехода ν , возникают

переходы с уровня E_2 на уровень E_1 с выделением энергии, при этом излучённая электромагнитная волна находится в фазе с падающей волной. Этот вид взаимодействия является основным для мазерного эффекта.

3. Спонтанное излучение. Этот вид перехода с более высокого уровня на более низкий не связан с внешним полем, он происходит спонтанно, без внешних причин. Таким образом, в этом типе излучения возникающая электромагнитная волна находится не в фазе с падающей волной.

В состоянии термодинамического равновесия уровни энергии E_1 и E_2 заполнены в соответствии с распределением Больцмана [1]. Для радиочастотных переходов отличие населённостей незначительно: при температуре $T = 300$ К и частоте перехода 10 ГГц относительная разность населённостей будет порядка 10^{-3} . При одинаковом количестве атомов на двух энергетических уровнях и при воздействии электромагнитным полем на частоте перехода ν происходят переходы как с нижнего уровня на верхний, так и наоборот, с одинаковой вероятностью. Для выявления перехода необходимо создать разность населённостей одного из уровней. Если создать разность населённостей с преимуществом верхнего энергетического уровня, то при облучении полем будут происходить преимущественно индуцированные переходы с излучением энергии, в обратном случае будут преимущественно происходить переходы с поглощением энергии.

Для создания разности населённостей между энергетическими уровнями, переход между которыми используется для стабилизации частоты в атомных часах (часовой переход), в основном используется два подхода:

- 1) селекция атомов в определённом энергетическом состоянии (обычно возбуждённом),
- 2) оптическая накачка.

Первый способ основан на разных магнитных свойствах атомов в разных состояниях. В радиочастотных стандартах используется сверхтонкая структура

спектральных линий, образованная в результате взаимодействия спина валентного электрона и спина ядра. В возбуждённом и в основном состоянии ориентации спина электрона отличаются, что приводит к отличному магнитному моменту всего атома. Для селекции используются специальные магнитные системы, которые отклоняют, либо, наоборот, не отклоняют, атомы в возбуждённом состоянии в нужном направлении, где происходит их взаимодействие с электромагнитным полем. Таким образом, данный метод применим к стандартам частоты, основанным на пучке атомов или молекул, например, цезиевые стандарты на атомно-лучевой трубке, водородные стандарты.

Второй способ используется в рубидиевых стандартах частоты и в цезиевых стандартах с оптической накачкой. Рассмотрим принцип работы оптической накачки пассивного радиочастотного стандарта на упрощенном примере трехуровневой системы [1]. Представим, что рабочее вещество (атомы) находится в колбе, помещенной в СВЧ-резонатор. На рис. 3а показано распределение Больцмана для населенности трёх уровней рабочего вещества, когда через него не проходит свет (нет накачки), а в резонаторе отсутствует СВЧ-поле. Переход 3-2 соответствует оптическому диапазону, а 2-1 – диапазону СВЧ. Оптический источник, использующий специальный фильтр, даёт излучение только на частоте ν_{32} перехода 3-2.

В результате воздействия света (накачки) с частотой ν_{32} на газ в колбе увеличивается населённость уровня 3 и уменьшается населённость уровня 2. При достаточной интенсивности поглощение света приведёт к насыщению перехода 3-2, населённости его уровней становятся равными (см. рис. 3б). Газ в колбе перестаёт поглощать свет, и фотодетектор регистрирует максимум интенсивности.

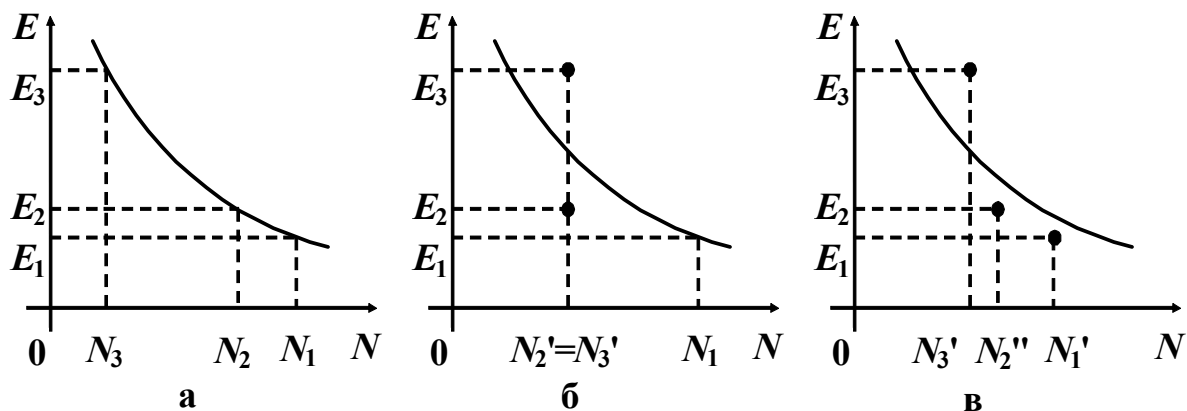


Рис. 3. Диаграмма энергетических уровней

Предположим, что в резонаторе имеется СВЧ-поле с частотой f_{Γ} , равной частоте ν_{21} перехода 2-1. Населённость уровня 1 больше населённости уровня 2 ($N_1 > N'_2$), поэтому происходит поглощение энергии СВЧ-поля, населённость уровня 1 уменьшается, а уровня 2 возрастет до $N''_2 > N'_2$ (см. рис. 3в). Следовательно, равенство населённостей уровней 3 и 2 нарушится, населённость N'_3 станет меньше N''_2 , начнётся поглощение света, и фотодетектор зарегистрирует уменьшение интенсивности света. Зависимость тока фотодетектора I_{ϕ} от частоты СВЧ-генератора f_{Γ} имеет вид, показанный на рис. 4. При $f_{\Gamma} = \nu_{21}$ наблюдается наибольшее поглощение света.

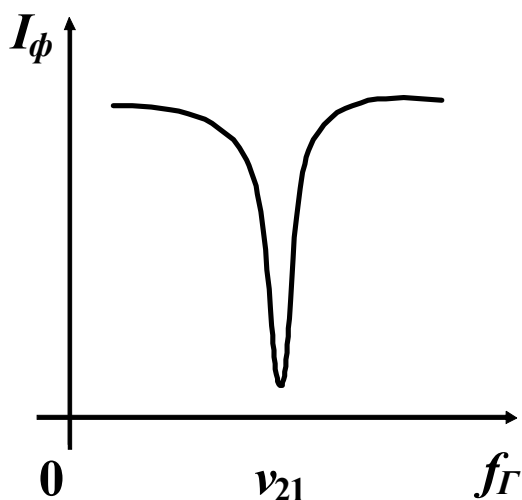


Рис. 4. Зависимость тока фотодетектора от частоты СВЧ-поля

Рассмотренную зависимость поглощения света от частоты поля f_{Γ} в резонаторе можно использовать для автоматической подстройки частоты (АПЧ) СВЧ-генератора под частоту перехода ν_{21} .

Таким образом, принцип работы пассивного стандарта частоты с оптической накачкой состоит в том, что, воздействуя на один энергетический переход, можно управлять поглощением излучения на частоте другого энергетического перехода. Поэтому этот метод называют также методом двойного резонанса.

3. Рубидиевые стандарты частоты

Стандарты частоты на рубидиевой ячейке – наиболее часто производимые коммерческие атомные часы. Они малогабаритные, потребляют относительно мало энергии и, в целом, недорогие. Они широко используются в телекоммуникационных системах, включая сотовую связь, в качестве источника опорных частот. Они также часто используются в качестве внутренних стандартов частоты в лабораторных приборах, таких как счетчики частоты, генераторы сигналов и анализаторы. Рубидиевые часы были первыми атомными часами, использовавшимися на орбитальных космических аппаратах, и стали основной технологией часов, используемой в спутниковой системе навигации GPS [2].

В переходе рубидия используется сверхтонкое основное состояние изотопа ^{87}Rb . Сверхтонкая структура показана на рис. 5. Здесь F – полный магнитный момент атома ^{87}Rb , а m_F – проекция F вдоль магнитного поля. При переходе между двумя разрешёнными энергетическими состояниями F спин валентного электрона изменяет направление и происходит испускание или поглощение фотона с частотой, соответствующей разности энергий.

Физическая часть рубидиевого стандарта (рис. 6) представляет собой устройство с оптической накачкой, состоящее из ряда стеклянных ячеек,

содержащих небольшое количество рубидия в газообразном равновесном состоянии.

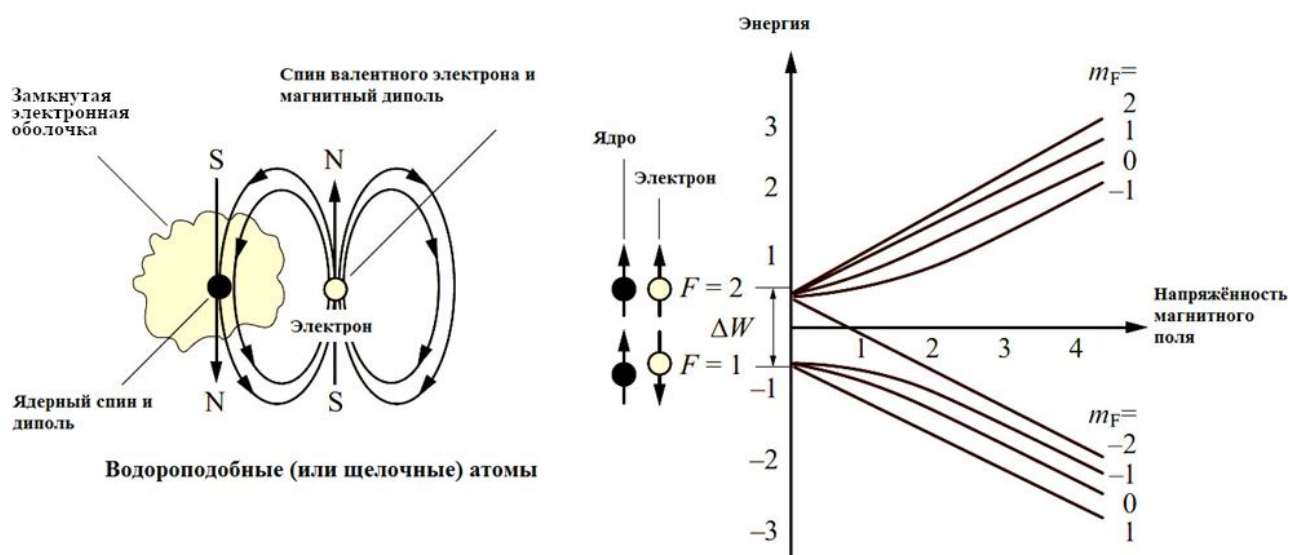


Рис. 5. Сверхтонкая структура изотопа ^{87}Rb

Состояние атомов рубидия в резонансной ячейке выбирается с помощью излучения лампы с изотопом ^{87}Rb , которое фильтруется через ячейку, содержащую изотоп ^{85}Rb . Резонансная ячейка также содержит буферный газ, (обычно азот и аргон или ксенон), чтобы удерживать рубидий в равновесном состоянии и минимизировать взаимодействие рубидия со стенками ячейки. Лампа возбуждается до состояния плазмы, создавая полный набор спектральных линий изотопа ^{87}Rb . Только одна из этих линий нужна для опроса атомов ^{87}Rb в резонансной ячейке. Фильтр через ячейку с изотопом рубидия ^{85}Rb устраняет большую часть нежелательного спектрального света. В результате свет, прошедший через фильтр, возбуждает только переход с уровня $5S_{1/2}$, $F=1$ на верхние уровни $5P$, а переход с $F=2$ не происходит. Получается, что атомов в состоянии $F=1$ становится меньше, чем в состоянии $F=2$. Под воздействием оптического излучения накачки происходит насыщение верхних уровней, поглощение света прекращается, среда становится прозрачной, и ток фотодетектора становится максимальным. При воздействии СВЧ-поля на частоте перехода из-за того, что населённость подуровня $F=2$ выше, чем $F=1$,

возникает индуцированное излучение, населённость подуровня $F = 1$ увеличивается и свет накачки опять поглощается, вследствие чего прозрачность среды уменьшается, и уменьшается ток фотодетектора. Упрощенная схема уровней в рубидиевом стандарте показана на рис. 7.

Сигнал, подаваемый в микроволновый резонатор, модулируется по частоте с частотой около 127 Гц. Выходной сигнал с фотодетектора пропорционален интенсивности света, которая изменяется с частотой 127 Гц (рис. 8). Изменение интенсивности будет минимальным при настройке входного сигнала на частоту перехода. Выходной сигнал фотодетектора используется как сигнал ошибки в петле обратной связи, которая настраивает частоту кварцевого генератора, чтобы минимизировать отклонение от частоты перехода в атомах ^{87}Rb . Фактический выходной сигнал стандарта создается кварцевым генератором.

Атомы ^{87}Rb в резонансной ячейке находятся при контролируемой температуре и магнитном поле, чтобы минимизировать воздействие окружающей среды. Ячейка находится в резонаторе, который создаёт в ячейке однородное радиочастотное поле. Номинальная частота микроволнового резонатора составляет около 6,834682611 ГГц.

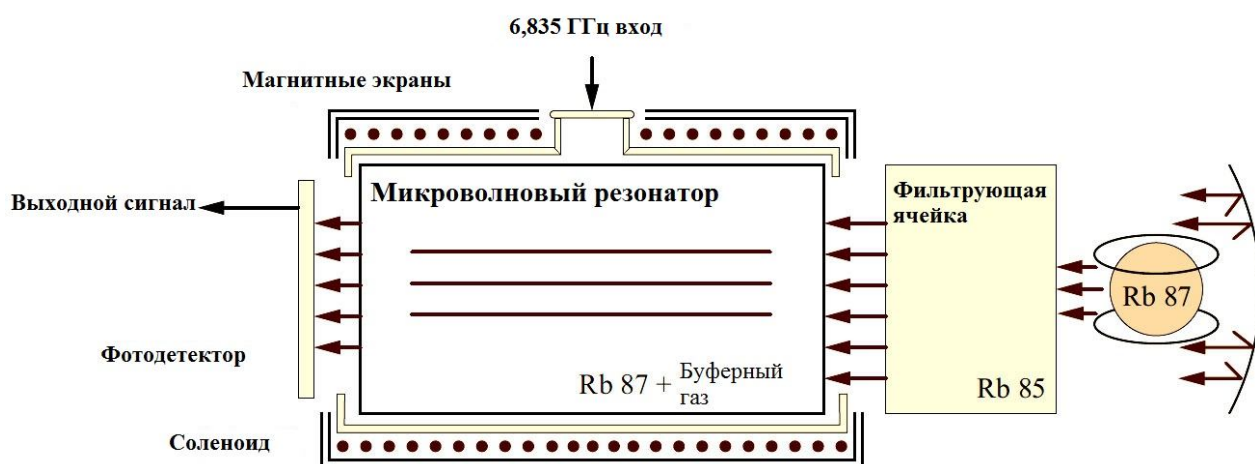


Рис. 6. Физическая часть рубидиевого стандарта

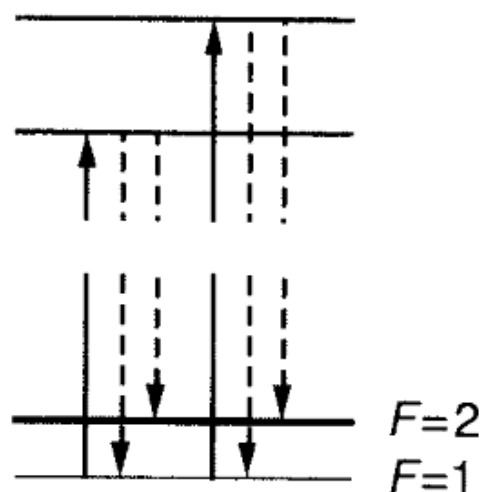


Рис. 7. Упрощенная схема уровней в рубидиевом стандарте

Типичная схема рубидиевых часов показана на рис. 8.

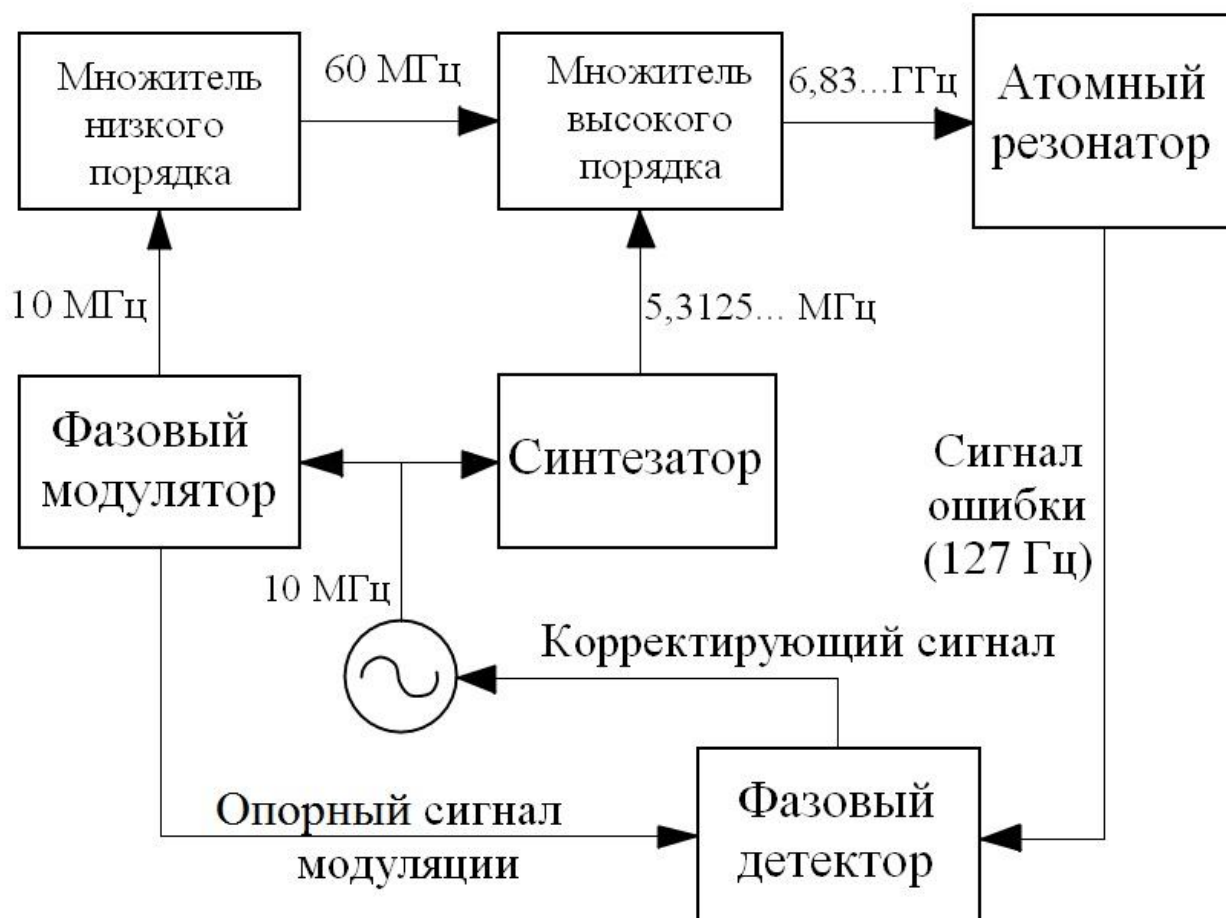


Рис. 8. Типичная схема рубидиевых часов

Рубидиевые часы, основанные на классическом методе оптической накачки, считаются вторичными стандартами частоты, поскольку на их собственную точность существенно влияют параметры окружающей среды, а для частоты характерен дрейф. Часы на газовых ячейках аналогичного устройства могут быть созданы с использованием цезия или, предположительно, других щелочных металлов. Однако использование других атомов не меняет основной природы часов данного типа и не делает их первичными эталонами.

4. Цезиевые стандарты частоты

Среди всех атомных часов цезиевые занимают особое место, поскольку эталон времени базируется на микроволновом переходе в атоме Cs [3]. В 1967г. 13-я Генеральная конференция по мерам и весам (CGPM) ввела следующее определение:

«секунда есть промежуток времени, состоящий из 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133».

Единственный стабильный изотоп ^{133}Cs имеет квантовое число ядерного спина, равное $I=7/2$. Учитывая, что квантовое число полного момента электронной оболочки составляет $J=1/2$, атом цезия в основном состоянии имеет два сверхтонких подуровня с квантовыми числами $F=I+J=4$ и $F=I-J=3$, которые расщепляются в магнитном поле на 16 компонентов, как показано на рис. 9. В цезиевых часах используется переход, обладающий наименьшей чувствительностью к магнитному полю, а именно, переход между состояниями $F=4, m_F=0$ и $F=3, m_F=0$ (см. рис. 10).

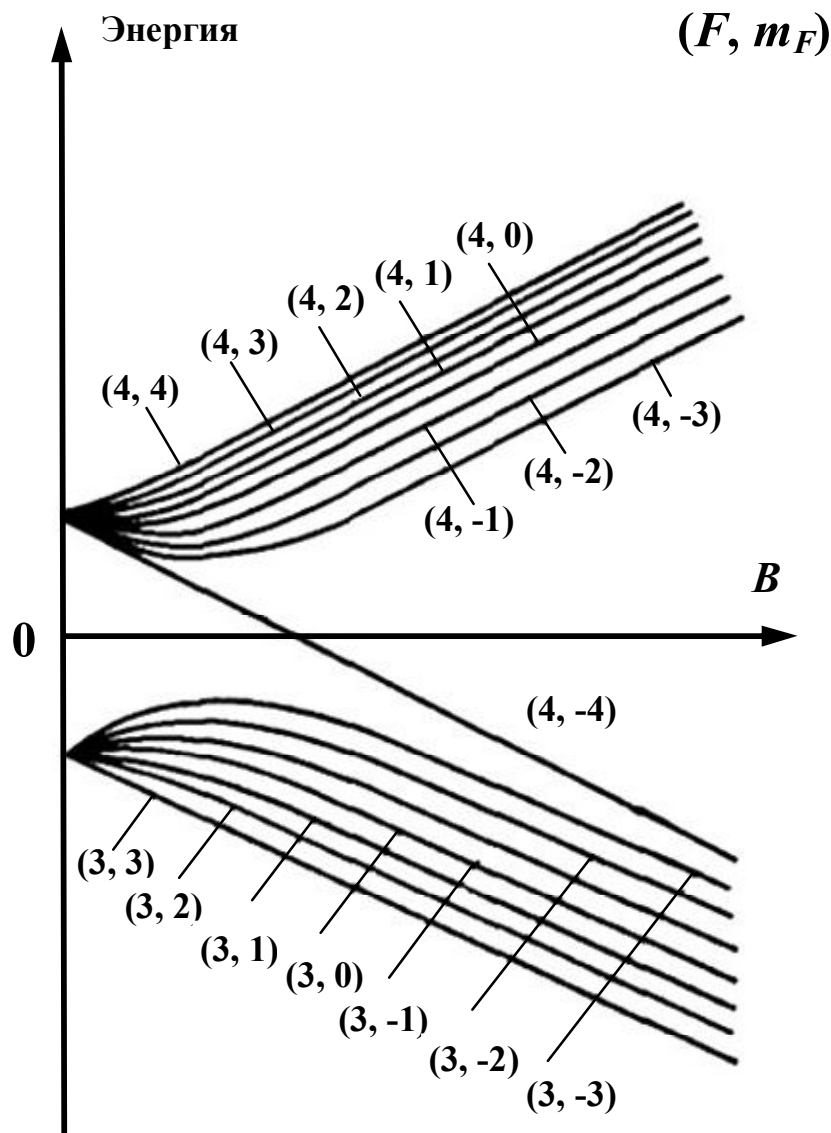


Рис. 9. Энергии магнитных компонентов сверхтонких подуровней с $F=3$ и $F=4$ уровня $6s^2S_{1/2}$ в ^{133}Cs в зависимости от индукции внешнего магнитного поля. Подуровни $F=4$ и $F=3$ расщепляются в магнитном поле на 9 ($+4 \leq m_F \leq -4$) и 7 ($+3 \leq m_F \leq -3$) компонентов соответственно

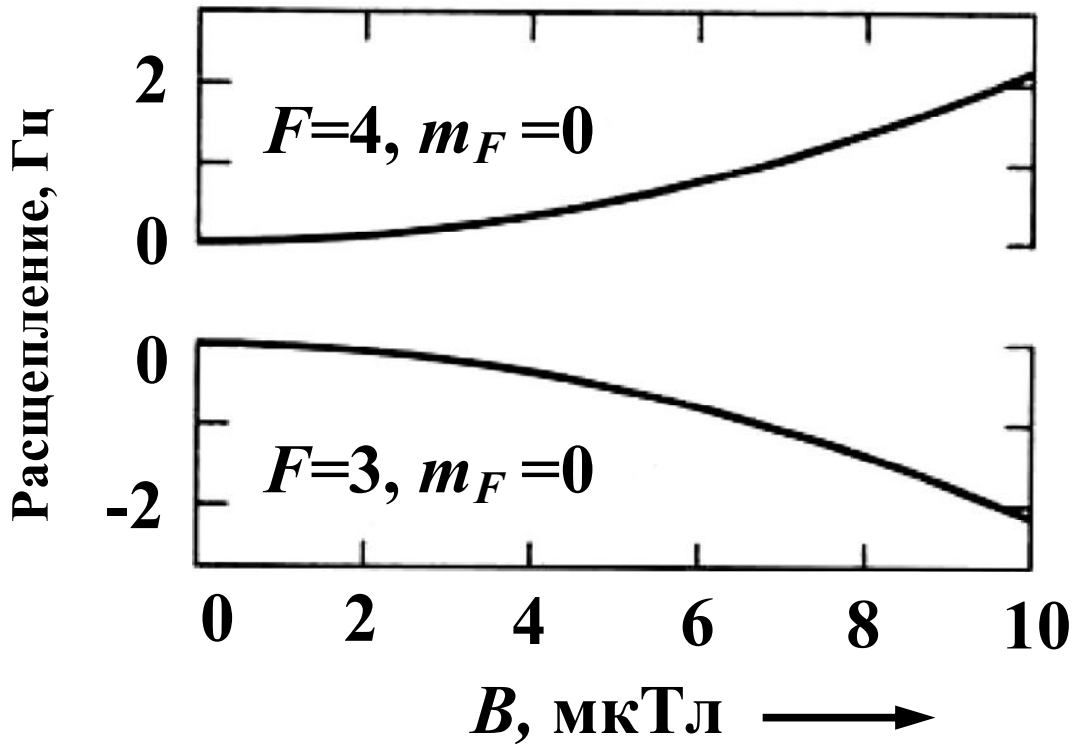


Рис. 10. Частота перехода между компонентами $F=4, m_F=0$ и $F=3, m_F=0$, равная 9192631770 Гц в нулевом магнитном поле и положенная в качестве определения единицы времени – секунды

Для возбуждения магнитного дипольного перехода $\Delta m_F=0$ магнитная составляющая осциллирующего возбуждающего поля должна быть направлена вдоль магнитной оси квантования. Переходы между компонентами $m_F \neq 0$ обладают линейным эффектом Зеемана в слабых магнитных полях с индукцией в диапазоне нескольких микротесла (см. рис. 9):

$$\Delta\nu_B = (g_{F=4} - g_{F=3})g_J m_F \mu_B B \approx 6,998 \cdot 10^3 \text{ Гц } m_F \frac{B}{\text{мкТл}}. \quad (4.1)$$

В таких магнитных полях уровни с $m_F=0$ обладают квадратичной зависимостью от величины индукции поля (см. рис. 10), а соответствующий сдвиг частоты можно выразить как

$$\Delta\nu_{B^2} \approx 4,2745 \cdot 10^{-2} \text{ Гц } \left(\frac{B}{\text{мкТл}} \right)^2. \quad (4.2)$$

В цезиевых часах атомы подготавливаются таким образом, что перед взаимодействием с полем они находятся либо на уровне $F=4$, $m_F=0$, либо на уровне $F=3$, $m_F=0$. Электромагнитное поле вызывает переходы на соответствующий незаселённый уровень. Измеряя населённость этого уровня после взаимодействия, можно определить частоту опрашивающего поля, при которой вероятность перехода оказывается максимальной. Эта частота корректируется с учетом всех известных эффектов, приводящих к сдвигам относительно частоты невозмущённого перехода, и полученный сигнал используется для генерации стандартной частоты или секундного импульса (PPS – pulse per second) каждые 9 192 631 770 периодов осцилляций.

Далее будет описано, как выполняется подготовка и опрос атомов в серийных цезиевых часах, выпускаемых промышленностью, где подбирается компромисс между точностью и стабильностью, с одной стороны, и весом системы, потребляемой ею мощностью и стоимостью прибора, с другой.

В большинстве цезиевых атомных часов используются пучки атомов Cs в глубоком вакууме. Пары цезия образуются в печи, разогретой до температуры около 100°C , в которой находится несколько граммов цезия. С помощью сопла или системы каналов формируется пучок атомов с тепловым распределением скоростей. Поскольку энергии уровней $F=3$ и $F=4$ незначительно отличаются друг от друга, населённость обоих уровней в пучке практически одинакова. Однако для регистрации перехода между уровнями пучок должен состоять из атомов лишь в одном из двух состояний. В обычных цезиевых атомных часах (таких, как серийные цезиевые часы) атомы в определённом состоянии отбираются по своему магнитному моменту. Как видно из рис. 9, энергия атома Cs, находящегося на подуровне $F=3$ в любом из магнитных состояний, уменьшается с ростом магнитного поля B при $B > 0,4$ Тл. Это верно также и для состояния $F=4$ и $m_F=-4$. Энергия атомов во всех остальных магнитных

состояниях сверхтонкого подуровня $F=4$, в свою очередь, растёт с увеличением магнитного поля. В присутствии градиента величины индукции магнитного поля $B(z)$ вдоль оси z потенциальная энергия атома W будет зависеть от координаты, что приведёт к возникновению силы, действующей на атомы Cs:

$$F_{\text{mag}} = -\frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{\partial W}{\partial B} \cdot \frac{\partial B}{\partial z} = -\mu_{\text{eff}} \cdot \frac{\partial B}{\partial z}. \quad (4.3)$$

Градиент поля $\partial W/\partial z$ определяется формой полюсов магнита. В однородном поле $\partial W/\partial z = 0$ и, следовательно, $F_{\text{mag}} = 0$. Кроме градиента поля, сила определяется эффективным магнитным моментом μ_{eff} , который пропорционален производной по магнитному полю от функций, представленных на рис. 9. Таким образом, на атомы цезия, находящиеся в разном состоянии, будет действовать разная сила (в разном направлении для $F=4$, $m_F=0$ и $F=3$, $m_F=0$), позволяющая осуществить пространственную селекцию атомов по состояниям.

В настоящее время в большинстве серийных моделей, производимых промышленностью, используется схема, представленная на рис. 11. Атомы, вылетающие из печи, отклоняются с помощью магнитного поляризатора, в котором создается неоднородное магнитное поле, в соответствии с их магнитным моментом.

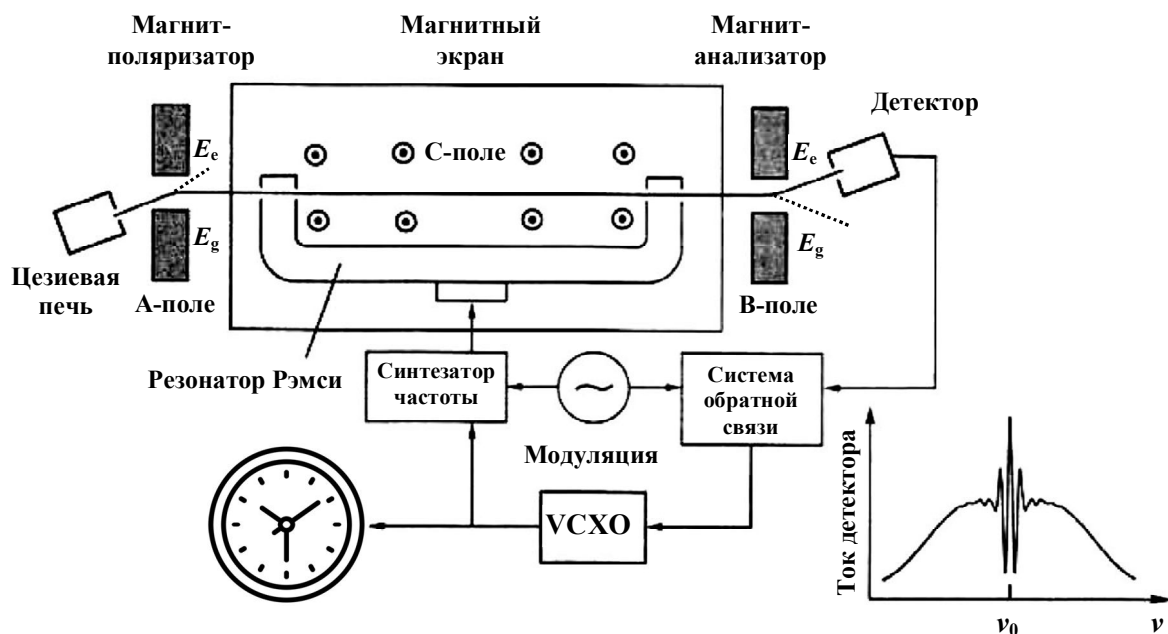


Рис. 11. Схема атомных Cs часов. Постоянное магнитное поле (С-поле), формирующее ось квантования, перпендикулярно плоскости листа. На врезке показана зависимость тока детектора от частоты синтезатора при её сканировании через атомный резонанс, что приводит к возникновению резонанса Рэмси [3], наблюдаемого на пьедестале Раби [3].

Такая магнитная селекция используется для приготовления атомного пучка у которого заселён только один из метрологических подуровней с $m_F=0$. Поскольку силы, действующие на атомы в состояниях $F=3$, $m_F=0$ и $F=4$, $m_F=0$, направлены в противоположные стороны, атомы, находящиеся в одном из состояний, выводятся из пучка, отклоняясь в противоположную сторону. В схеме, представленной на рис. 11, будем считать, что из пучка выводятся атомы в состоянии $F=4$, $m_F=0$, и, следовательно, в пучке, попадающем в зону взаимодействия, остаются только атомы в основном состоянии с энергией E_g . В зоне взаимодействия находится U-образный микроволновый резонатор, настроенный на частоту 9,192 ГГц.

В качестве резонатора используется стандартный волновод с прямоугольным сечением, торцы которого закрыты с помощью проводящих

пластин. Резонатор можно согнуть, как показано на рис. 11, чтобы атомный пучок пересекал его дважды вблизи торцов, влетая и вылетая через маленькие отверстия в стенках резонатора. У резонатора, представленного на рис. 11, поперечные размеры были выбраны таким образом, чтобы линии индукции магнитного поля стоячей волны, формирующейся внутри резонатора, были перпендикулярны плоскости изображения. Резонатор подпитывается микроволновым сигналом от кварцевого осциллятора, управляемого напряжением VCXO, или от термостабилизированного кварцевого осциллятора ОСХО. Атомы, находящиеся в состоянии E_g , пересекают первую область взаимодействия в U-образном микроволновом резонаторе, после чего, спустя некоторое время, они попадают во вторую область, что соответствует возбуждению по схеме Рэмси. Поле в резонаторе может вызвать переход с уровня $F=3$ на уровень $F=4$, вероятность которого зависит от разности между частотой поля в резонаторе и частотой атомного перехода. Вторая магнитная система – анализатор – отклоняет атомы, находящиеся на верхнем уровне, в детектор.

Для того, чтобы снять вырождение по магнитным подуровням и обеспечить возможность селективного возбуждения метрологического перехода с $F=3$, $m_F=0$ на $F=4$, $m_F=0$, область взаимодействия помещается в однородное магнитное поле. Традиционно это поле называется С-полем, по аналогии с полями поляризатора (А-полем) и анализатора (В-полем). Величина индукции поля подбирается таким образом, чтобы обеспечить компромисс при выполнении двух противоречащих друг другу условий. Так, оно должно быть достаточно сильным, чтобы разделить микроволновые резонансы по частоте. При этом С-поле сдвигает резонансную частоту метрологического перехода, что необходимо корректировать для получения частоты невозмущенного перехода. Кроме этого, увеличение напряженности С-поля приводит к увеличению уровня флуктуаций и, соответственно, уровню шумов частоты

перехода. В промышленных цезиевых часах С-поле обычно создается с помощью катушки, обмотка которой расположена вокруг резонатора в плоскости изображения на рис. 11. Следовательно, С-поле в этом случае будет направлено перпендикулярно этой плоскости. Поскольку частота перехода зависит от величины магнитного поля, необходимо использовать магнитные экраны для подавления лабораторного магнитного поля и его флуктуаций.

Одним из видов детекторов для атомов цезия является ионизационный детектор, состоящий из вольфрамовой или иридиево-платиновой ленты, которая нагрета до высокой температуры, в частности, чтобы предотвратить образование поверхностных слоёв из-за поглощенных газов (детектор Лэнгмюра–Тейлора). Поскольку работа выхода электрона у атома цезия (1,7эВ) существенно ниже, чем у вольфрама (4,5эВ), атом Cs легко ионизируется на раскаленной проволоке, отдавая внешний электрон. Накладывая внешнее напряжение, можно регистрировать положительно заряженные ионы цезия, например, с помощью фарадеевского электрода, что использовалось в ранних версиях первичных цезиевых стандартов. В более современных часах используется масс-спектрометр для того, чтобы отделить ионы Cs от других ионов, которые образуются вблизи детектора. После этого ионы цезия направляются на первую ступень электронного умножителя, который усиливает поток электронов, эмитированных при столкновении ионов с катодом. В отличие от прямого метода регистрации ионов Cs с помощью фарадеевского электрода, описанный метод обладает гораздо меньшей постоянной времени. Это позволяет использовать более высокие частоты модуляции микроволнового поля, что требуется для стабилизации частоты генератора относительно атомного резонанса.

Сканирование частоты генератора ν вблизи частоты атомного резонанса ν_0 приводит к возникновению сигнала на токовом детекторе, аналогичного тому, который представлен на рис. 11. Спектральная линия состоит из

интерференционных полос резонанса Рэмси [3] на широком пьедестале Раби [3]. Атомы, возбуждённые когерентным образом при прохождении двух зон взаимодействия в резонаторе, формируют интерференционные резонансы Рэмси. Взаимодействие с радиочастотным полем в первой зоне переводит атомы Cs в когерентную суперпозицию состояний $F=4, m_F=0$ и $F=3, m_F=0$, при этом квантово-механическое состояние атома начинает эволюционировать во времени с частотой, соответствующей разнице энергий уровней. После прохождения второй зоны взаимодействия с возбуждающим полем вероятность обнаружения атома на уровне $F=4$ или $F=3$ будет зависеть от разности между фазой внешнего радиочастотного поля и фазой колебаний атомного осциллятора. Таким образом, населенности уровней $F=4$ и $F=3$ на выходе из зоны взаимодействия являются осциллирующими функциями частоты генератора, что приводит к появлению интерференционной структуры Рэмси. Усреднение интерференционной картины по широкому тепловому распределению по скоростям приводит к быстрому снижению контраста боковых полос. Пьедестал Раби, в свою очередь, соответствует доплеровски уширенной линии перехода, возбуждаемой независимо в каждой из зон взаимодействия.

Частота генератора, подключённого к резонатору, стабилизируется относительно максимума центральной полосы, что соответствует частоте атомного перехода ν_0 . Для этого на сигнал генератора накладывается частотная модуляция, и сигнал от фазово-чувствительного детектора служит сигналом ошибки для петли обратной связи. Проинтегрированный сигнал ошибки используется системой автоподстройки для стабилизации частоты осциллятора VCXO. Одновременно синтезируются стандартные частоты, например 5 МГц, а также секундные импульсы.

В С-поле метрологический переход испытывает квадратичный по полю сдвиг относительно частоты невозмущённого перехода, определенной как

9192631770 Гц. Для того, чтобы частота на выходе из VCXO точно соответствовала значению, определенному в Международной системе единиц СИ, необходимо учесть этот сдвиг путём введения соответствующей коррекции в синтезатор, для чего необходимо знать напряжённость С-поля. Напряжённость С-поля определяется по частоте переходов, обладающих линейным эффектом Зеемана.

Относительная погрешность серийных часов лежит в диапазоне от $2 \cdot 10^{-12}$ до $5 \cdot 10^{-13}$. График девиации Аллана таких часов представлен на рис. 1. После усреднения по 10-и дням измерений нестабильность падает вплоть до $5 \cdot 10^{-15}$, что соответствует уровню фликкерного шума [4, 5].

Атомные цезиевые часы, выпускаемые промышленным образом, находят применение в различных областях. Прежде всего, их используют в метрологических лабораториях времени. Так, при создании международной атомной шкалы времени (TAI) специальным образом усредняются показания около двухсот часов. Такие цезиевые часы используются как в сегменте управления, так и в космическом сегменте глобальных систем спутниковой навигации (GNSS), таких как GPS, ГЛОНАСС и GALILEO. Другое применение цезиевых часов находится в сфере телекоммуникаций, включающей радио, телеграф, телевидение, телефон, системы передачи данных и глобальные компьютерные сети, где они служат для синхронизации передачи сигналов. Кроме этого, цезиевые часы используются для синхронизации радиоуправляемых часов, которые получают точный сигнал времени от радиопередатчиков.

5. Водородные стандарты частоты

В дополнение к компактным и относительно недорогим рубидиевым часам, зачастую используемых в приложениях, в которых предъявляются умеренные требования к точности, и к цезиевым атомным часам, занимающим выделенное положение среди стандартов частоты, поскольку именно они

реализуют единицу времени и частоты (по определению), широкое распространение получили водородные стандарты частоты и времени. Водородные стандарты превосходят наилучшие цезиевые часы по стабильности как на коротких, так и на длительных интервалах времени. Важно отметить, что более 90% вклада в международную шкалу атомного времени TAI, на основе которой формируется шкала всемирного координированного времени UTC, дают именно водородные стандарты. Поэтому рассмотрим устройство квантовых стандартов частоты данного типа более подробно.

Стандарт частоты и времени водородный (СЧВВ) функционально состоит из двух основных частей – собственно водородного генератора (ВГ), выдающего высокостабильный сигнал с частотой 1420,405 МГц и мощностью порядка от 100 до 200 фВт, и электронного блока, обеспечивающего приём и усиление сигнала с ВГ, перенос системой ФАПЧ стабильности частоты ВГ на частоту опорного кварцевого генератора, и настройку системой АНР (автоматической настройки резонатора) частоты СВЧ-резонатора на линию излучения атомов водорода.

5.1. Водородный генератор

В ВГ используется квантовый переход между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода с $F = 1$, $m_F = 0$ и $F = 0$, $m_F = 0$ с частотой, приблизительно равной 1,420405 ГГц.

Зависимость энергии сверхтонких подуровней от величины внешнего постоянного магнитного поля описывается с помощью формулы Брейта–Раби [6]:

$$E(F = 1, m_F) = -\frac{1}{4} E_{HFS} - g_I \mu_B B m_F + \frac{1}{2} E_{HFS} \sqrt{1 + 2m_F x + x^2}, \quad (5.1)$$

$$E(F = 0) = -\frac{1}{4} E_{HFS} - \frac{1}{2} E_{HFS} \sqrt{1 + x^2},$$

где $x = (g_I + g_J) \mu_B B / E_{HFS}$, g_I и g_J – спектроскопические факторы для полного момента электрона и спина ядра, μ_B – магнетон Бора, B – индукция внешнего

магнитного поля, E_{HFS} – энергия сверхтонкого расщепления атома водорода в отсутствии внешнего магнитного поля. Диаграмма уровней во внешнем магнитном поле [6] с учётом обозначений, введённых в (5.1), представлена на рис. 12.

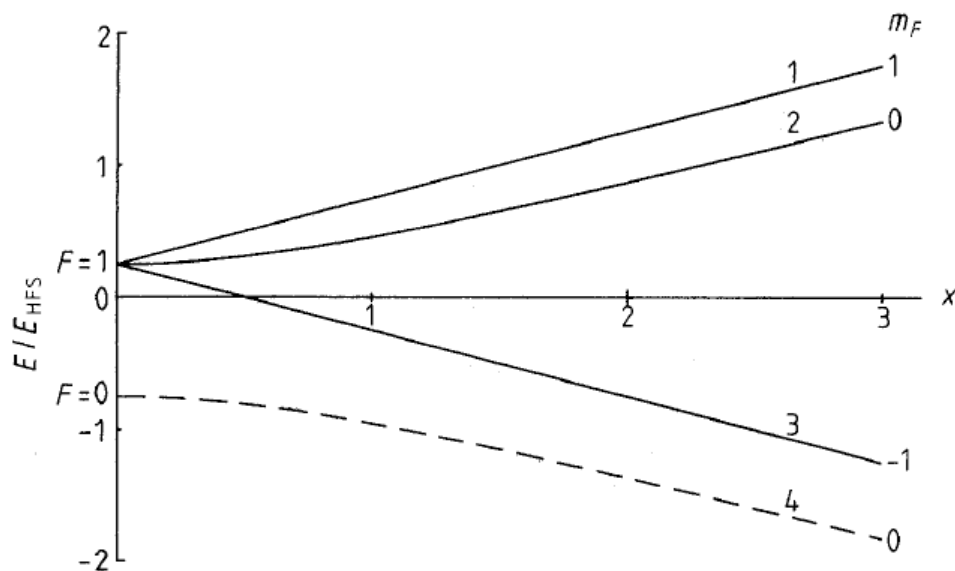


Рис. 12. Уровни энергии сверхтонкой структуры основного состояния атома водорода во внешнем магнитном поле

На рис. 13 представлена упрощенная схема, на основе которой поясним принцип работы ВГ.

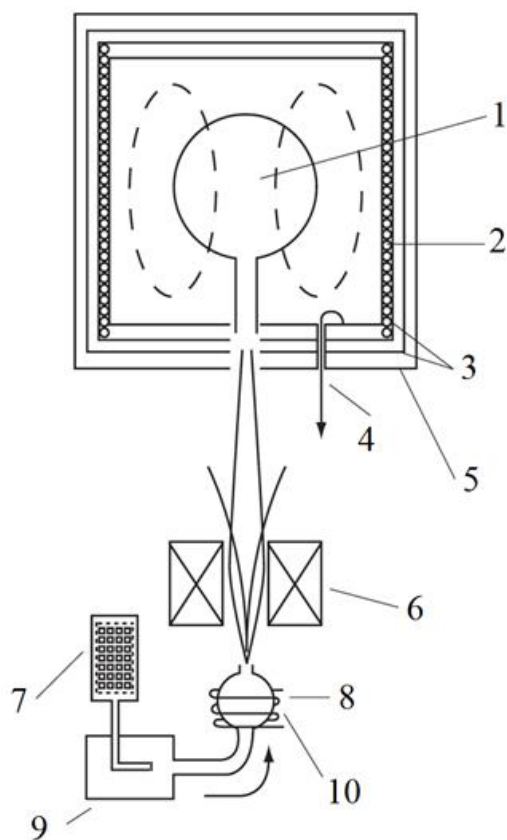


Рис. 13. Основные элементы конструкции ВГ. 1 – накопительная колба; 2 – сверхвысокочастотный резонатор; 3 – магнитные экраны и соленоид подмагничивания; 4 – петля связи; 5 – вакуумный колпак; 6 – сортирующая система; 7 – источник молекулярного водорода; 8 – высокочастотный генератор; 9 – очиститель; 10 – разрядная колба

Атомарный водород образуется в разрядной колбе 10 в результате диссоциации молекулярного водорода 7 в высокочастотном разряде 8. Очистка от примесей и подача молекулярного водорода осуществляется через очиститель 9, принцип работы которого основан на способности молекулярного водорода проникать через никелевую трубку при нагревании. Изменяя температуру трубки, можно

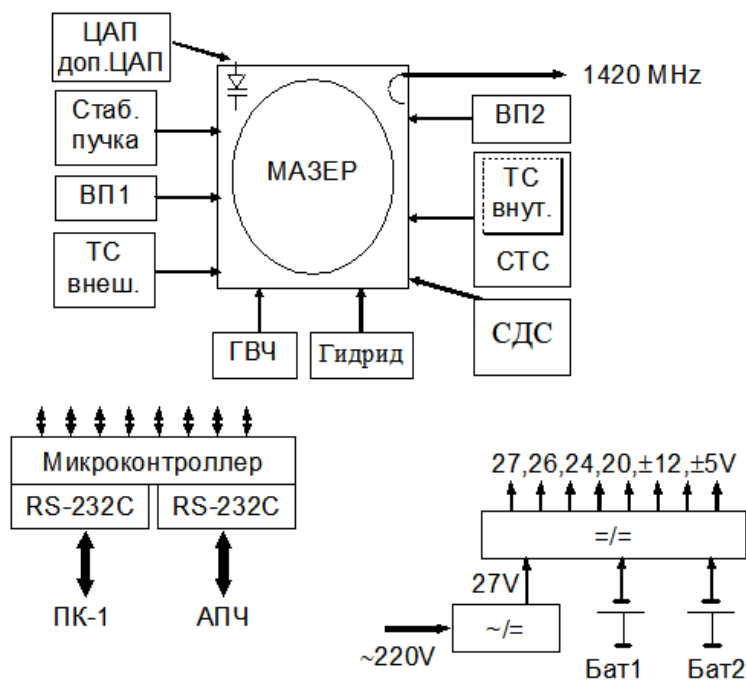
управлять давлением молекулярного водорода в области разряда в диапазоне от 10 до 50 Па. Диссоциация молекул водорода происходит вследствие ударной ионизации в электромагнитном поле с частотой около 100 МГц. Для формирования пучка атомов водорода с узкой диаграммой направленности используют коллиматор, состоящий из набора длинных каналов и изготовленный из стекла. Далее пучок атомов водорода попадает в сортирующую систему 6. Принцип селекции по состояниям основан на пространственном разделении атомов в различных квантовых состояниях под действием внешнего неоднородного магнитного поля. Атомы в состояниях $F = 1, m_F = 0, +1$ отклоняются к оси магнита и направляются в накопительную колбу 1, атомы в состоянии $F = 0, m_F = 0$ и $F = 1, m_F = -1$ отклоняются от оси магнита и отсортировываются из пучка.

Накопительная колба изготавливается из плавленого кварца, имеет сферическую или цилиндрическую форму, располагается в центре высокочастотного цилиндрического резонатора 2, настроенного на частоту атомного перехода. Во избежание разрушения атомного пучка при столкновениях с остаточным газом с помощью геттерного насоса поддерживается необходимый уровень вакуума 5. В ВГ используются две независимые вакуумные системы, состоящие из геттерного насоса и трёх магниторазрядных насосов. Геттерный насос, в совокупности с первым магниторазрядным насосом, создает и поддерживает вакуум в системе формирования пучка атомарного водорода. Второй и третий магниторазрядные насосы обеспечивают вакуум в СВЧ резонаторе. Активация адсорбента в геттерных насосах осуществляется на заводе-изготовителе путём нагрева электрическими нагревателями до температуры 800 °С. Включение магниторазрядных насосов осуществляется в условиях высокого вакуума с давлением остаточных газов не более $2 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. Уровень вакуума контролируется по величине тока магниторазрядных насосов. Размер входного

отверстия колбы мал по сравнению с геометрическими размерами, что позволяет атомам претерпевать около 10^4 – 10^5 соударений со стенками. На стенки колбы наносится специальное покрытие, в результате взаимодействия с которым атомы практически не изменяют своего квантового состояния, а также минимизируется сдвиг частоты генерации за счёт столкновений атомов со стенкой. Таким образом, среднее время взаимодействия с электромагнитным полем микроволнового резонатора составляет около 1 с. Условием для самовозбуждения колебаний в резонаторе является превышение энергии индуцированного излучения атомов над энергией потерь в резонаторе.

Для сохранения квантовых состояний атомов в области накопительной колбы создается поле подмагничивания. Поскольку частота используемого перехода имеет слабую квадратичную зависимость от магнитного поля, для ослабления влияния внешних магнитных полей используются системы термостатирования (внешний и внутренний термостаты) и магнитного экранирования, внутрь которых помещается СВЧ резонатор мазера. Коэффициент экранирования системы, состоящей из четырёх магнитных экранов, составляет примерно 10^5 . Двухступенчатая, многозонная термостатирующая система обеспечивает поддержание температуры СВЧ резонатора с точностью 0,0001 °С. Контроль температуры осуществляется с помощью датчиков, помещённых в разных точках системы 3. Полезный сигнал выводится из резонатора через коаксиальный кабель, поступает на вход приёмника и используется для подстройки кварцевого генератора.

Структурная схема, отображающая электронные блоки водородного генератора и используемые на схеме сокращения, изображена на рис. 14.



ТС внеш./внут. – внешние и внутренние термостаты;

СТС – термостат схем управления внутренними термостатами;

ВП1/2 – источники высокого напряжения, обеспечивающие работу магниторазрядных насосов;

Стаб. пучка – стабилизатор пучка, обеспечивающий работу очистителя;

ГВЧ – ВЧ генератор, обеспечивает диссоциацию молекулярного водорода;

Гидрид – источник молекулярного водорода;

~/=, =/= – преобразователи напряжений питания;

Микроконтроллер – внутренний микропроцессор, обеспечивающий управление блоком ВГ, а также связь с блоком АПЧ и управляющим компьютером через интерфейс RS-232C;

Бат1/2 – внешние батареи резервного питания от 24 до 27 В.

Рис. 14. Электронные блоки водородного генератора

5.2 Блок автоматической подстройки частоты

Блок АПЧ в качестве основной функции обеспечивает формирование выходных сигналов стандарта с помощью фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) кварцевого генератора 5 МГц по сигналу водородного мазера. Кроме того, блок АПЧ содержит узлы системы автоматической настройки резонатора (АНР).

Структурная схема системы ФАПЧ блока АПЧ изображена на рис. 15. Отдельно показан блок питания, состоящий из преобразователей ~/= и =/=. Система фазовой автоподстройки локального кварцевого генератора частотой

5 МГц (ГК-5 МГц) по сигналу водородного мазера содержит следующие элементы:

- малошумящий преобразователь частоты;
- умножитель частоты;
- фазовый детектор (ФД);
- кварцевый генератор 5 МГц;
- перестраиваемый синтезатор частоты 405,751 кГц;
- оптический модуль;
- делитель частоты;
- микроконтроллер.

Преобразователь частоты обеспечивает перенос частоты 1,420 ГГц сигнала, генерируемого мазером, на частоту фазового детектора 405 кГц. В качестве опорного сигнала для преобразователя используется сигнал локального кварцевого генератора 5 МГц, прошедший через умножитель частоты. Умножитель частоты предназначен для формирования сигналов 10 МГц и 100 МГц путём умножения частоты кварцевого генератора. Перестраиваемый синтезатор частоты используется для формирования сигнала сравнения, подаваемого на фазовый детектор. Синтезатор обеспечивает дискретную электронную перестройку выходных частот с относительным шагом $1 \cdot 10^{-16}$ от их номинальных значений. Полный диапазон перестройки выходной частоты стандарта синтезатором составляет $1 \cdot 10^{-10}$. Сигнал с выхода фазового детектора подвергается низкочастотной фильтрации и используется для управления частотой локального кварцевого генератора 5 МГц. Делитель частоты предназначен для формирования выходных сигналов шкалы времени 1 Гц, а также синхронизации выходных сигналов 1 Гц по внешнему сигналу 1 Гц. Микроконтроллер обеспечивает контроль основных параметров узлов, входящих в БАПЧ, и связь с управляющим компьютером.

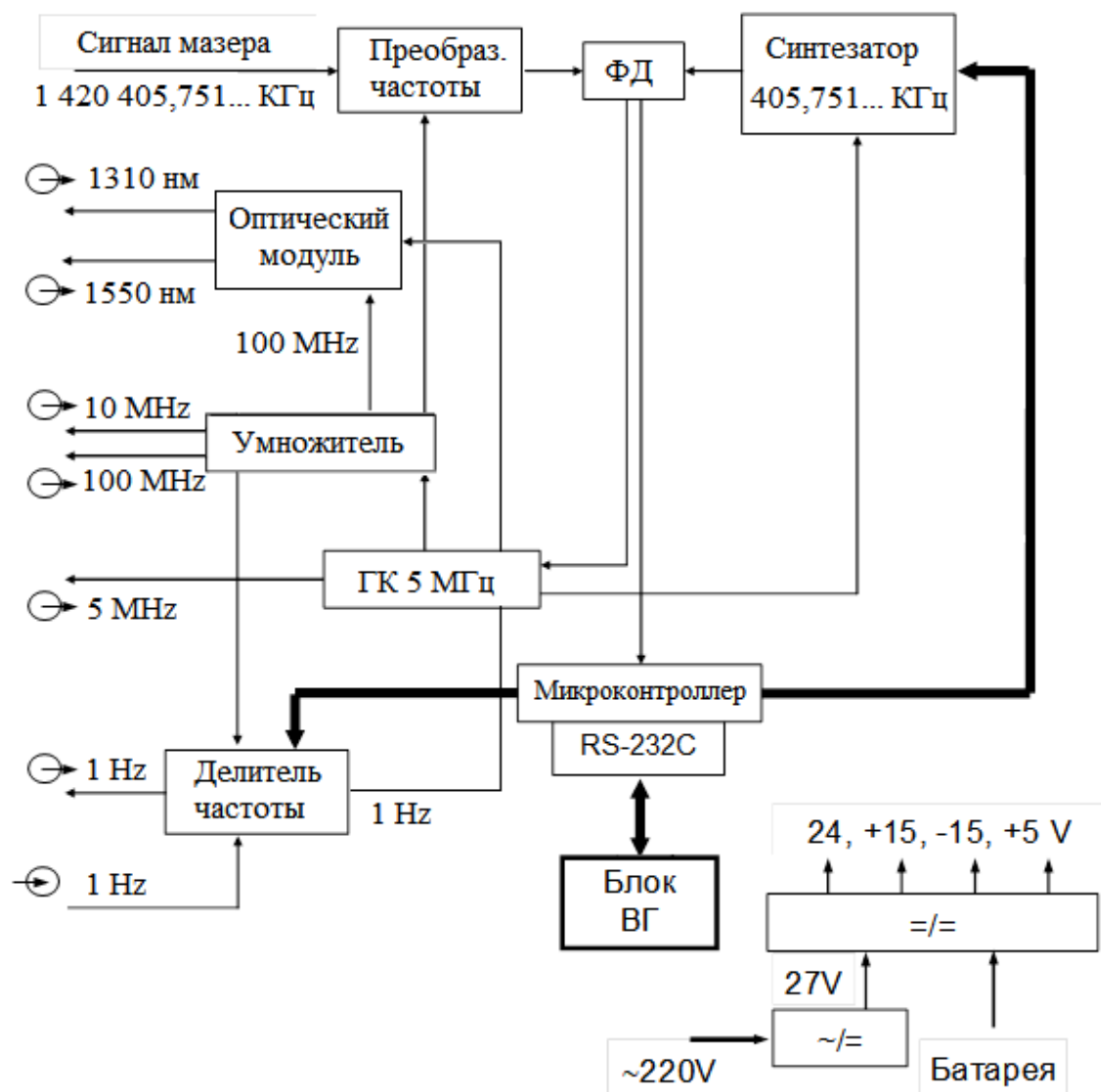


Рис. 15. Структурная схема блока АПЧ

5.3 Блок автоматической настройки резонатора

Настройка частоты СВЧ резонатора на вершину спектральной линии излучения атомов водорода осуществляется следующим образом. Мазер представляет собой двухконтурную автоколебательную систему. Первым колебательным контуром является СВЧ резонатор, роль второго колебательного контура играет спектральная линия излучения атомов водорода. При появлении разности частот между этими контурами возникает эффект затягивания выходной частоты мазера, описываемый следующим приближенным соотношением:

$$f_{BG} = f_L \left(1 + \frac{Q_P}{Q_L} \frac{f_P - f_L}{f_L} \right), \quad (5.2)$$

где f_{BG} – частота генерации мазера; $f_L = 1420,4057517$ МГц – частота спектральной линии излучения водорода; f_P – частота СВЧ резонатора; $Q_L \approx 2 \cdot 10^9$ – добротность спектральной линии излучения водорода; $Q_P \approx 4 \cdot 10^4$ – добротность СВЧ резонатора. Таким образом, чтобы выходная частота мазера не зависела от добротности спектральной линии (количества атомов в накопительной колбе), необходимо настраивать частоту СВЧ резонатора. Одним из наиболее эффективных методов настройки частоты СВЧ резонатора на вершину спектральной линии излучения атомов водорода является метод модуляции частоты резонатора. В этом методе сдвиг выходной частоты мазера, описываемый соотношением (5.2), компенсируется сдвигом за счёт спин-обменных столкновений атомов водорода в накопительной колбе. При выполнении этого условия изменение добротности спектральной линии не оказывает влияния на выходную частоту мазера. Структурная схема автономной системы АНР приведена на рис. 16, а упрощенный принцип её работы показан на рис. 17.

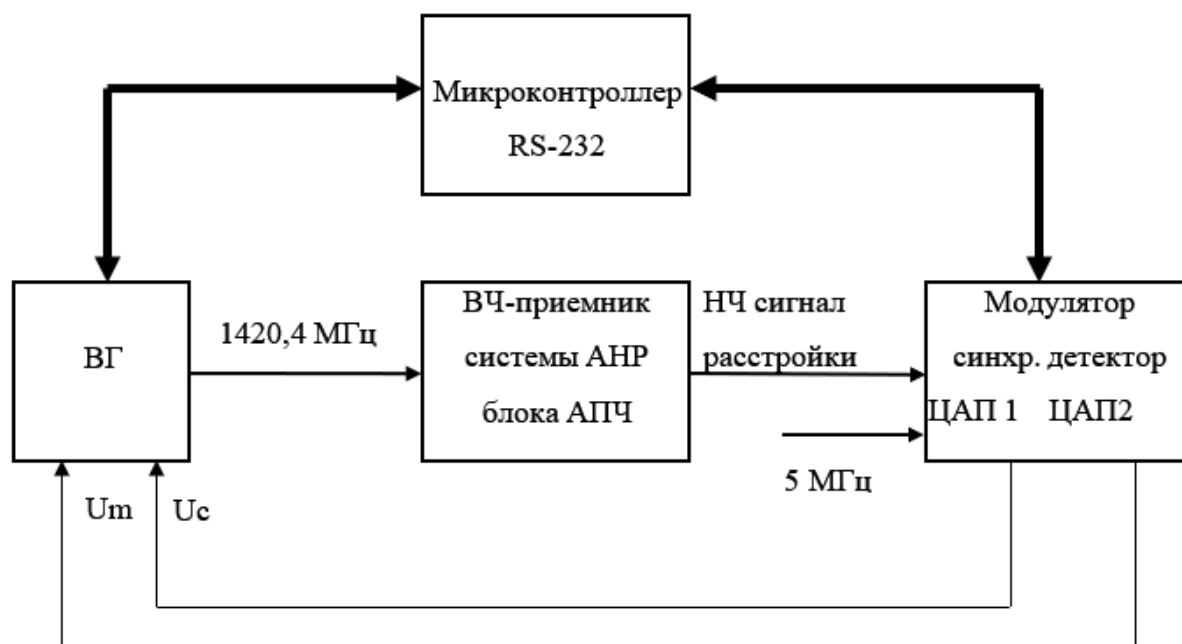


Рис. 16. Структурная схема АНР

Частота резонатора ВГ модулируется переключением напряжения U_m модулирующего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП2) на модулирующем варикапе, что приводит к появлению амплитудной модуляции в сигнале генерации ВГ. Сигнал ошибки, несущий информацию о расстройке резонатора, выявляется при синхронном детектировании преобразованного сигнала ВГ.

Управление частотой резонатора производится настраиваемым варикапом, напряжение смещения на который U_c поступает с цифроаналогового преобразователя (ЦАП1), находящегося в узле модулятора блока АПЧ. Перестройка частоты осуществляется с шагом примерно $1 \cdot 10^{-16}$, при этом полная перестройка частоты составляет около $3 \cdot 10^{-10}$.

Компенсация затягивания выходной частоты сдвигом, обусловленным спин-обменными столкновениями, происходит за счёт тонкой настройки средней частоты резонатора с помощью подбора скважности импульсного напряжения U_m . Критерием настройки является независимость выходной

частоты от добротности спектральной линии, изменение которой осуществляется изменением интенсивности пучка атомов водорода.

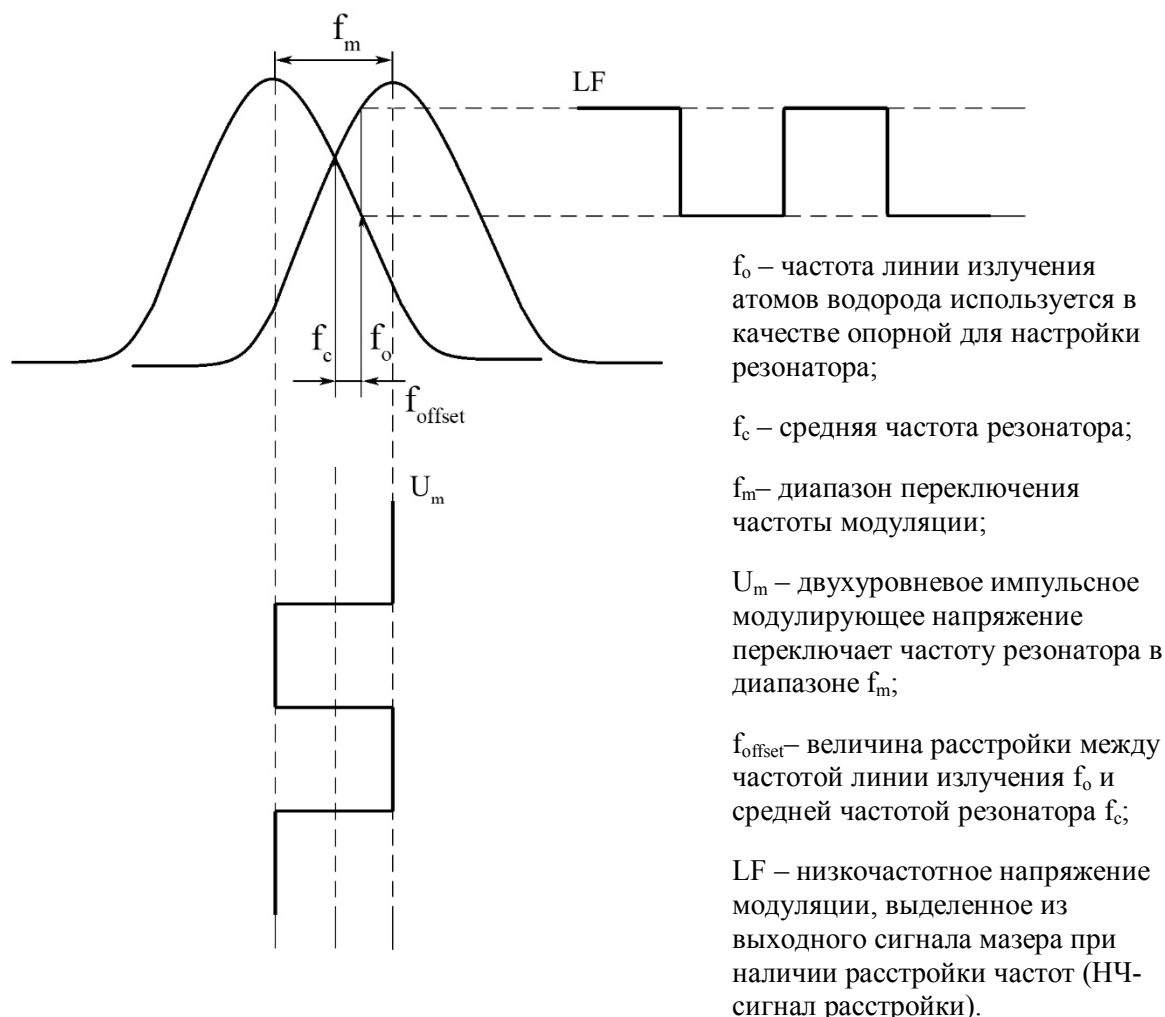


Рис. 17. Упрощенный принцип работы системы АНР

5.4 Нестабильность частоты водородного генератора

Предельно возможная нестабильность частоты ВГ, обусловленная тепловыми шумами СВЧ резонатора, определяется следующим выражением [7]:

$$\sigma_p(\tau) = \frac{1}{Q_L \sqrt{P}} \sqrt{\frac{k_B T_p}{2\tau}}, \quad (5.3)$$

где k – постоянная Больцмана; T_p – температура резонатора в Кельвинах; τ – интервал времени измерения. Влияние шумов СВЧ резонатора будет преобладающим, начиная с $\tau \approx 10$ с. На меньших интервалах времени измерения преобладает шум приёмной аппаратуры, вносимая им нестабильность частоты определяется следующим образом [7]:

$$\sigma_{np}(\tau) = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{\frac{k_B T_n F B}{P\tau^2} \frac{1+\beta}{\beta}}, \quad (5.4)$$

где F , B , T_n – коэффициент шума, полоса и температура приемника соответственно, β – коэффициент связи с приемником. Эти зависимости графически изображены на рис. 18, где также приведен график нестабильности частоты от интервала времени измерения для СЧВВ Ч1-1035.

На больших интервалах времени измерения ($\tau \geq 100$ с) начинает сказываться влияние температуры и расстройки резонатора. Начиная с $\tau \geq 10000$ с появляются такие дестабилизирующие факторы, как дрейф атомной линии и нестабильность внешнего магнитного поля. При этом на интервалах времени измерения от 1 с до 3600 с достигаются предельные значения по нестабильности выходной частоты СЧВВ. Для дальнейшего уменьшения нестабильности частоты необходимо, согласно (5.3), увеличивать значение параметра $Q_L \sqrt{P}$. За более чем полувековую историю своего развития в результате экспериментальных и теоретических исследований по выявлению и устранению причин, влияющих на частоту и нестабильность ВГ, нестабильность частоты СЧВВ уменьшилась почти в 1000 раз с единиц 10^{-13} до 10^{-16} и достигла практически предела, определяемого тепловыми шумами резонатора.

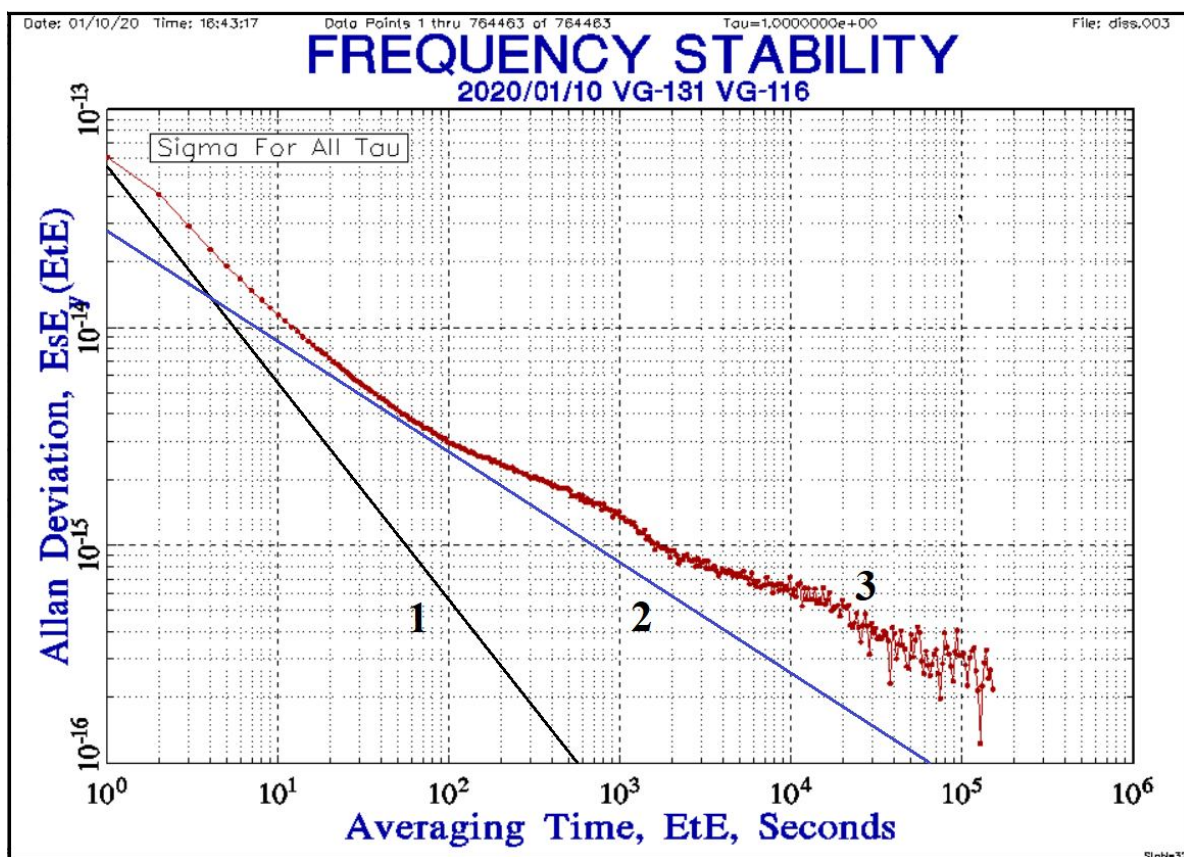


Рис. 18. Графики зависимости нестабильности частоты от интервала времени измерения: 1 – теоретический уровень, обусловленный тепловыми шумами приемника; 2 – теоретический уровень, обусловленный тепловыми шумами СВЧ резонатора; 3 – СЧВВ Ч1-1035

Одной из возможностей, позволяющей теоретически ещё несколько отодвинуть этот предел, является получение и использование в ВГ системы двойной сортировки атомов по квантовым состояниям, до сих пор не реализованной на промышленно выпускаемых СЧВВ.

6. Заключение

Невозможно переоценить вклад методов точных измерений времени и частоты в развитие мировой науки, технологии и экономики. В качестве частных примеров можно привести глобальные коммуникационные сети и точные системы спутниковой навигации, необходимым условием слаженной работы которых является наличие стабильных источников точно известной частоты. Точные измерения частоты позволяют выполнить наиболее чувствительные тесты фундаментальных теорий. Область науки, посвященная частотным стандартам, оказывается тесно связана с прогрессом в этих и многих других областях, открывая возможности использования высокоточных часов для обобщения результатов измерений, полученных в различных местах и в различное время в общую систему.

Прогресс в областях, связанных с разработкой стандартов частоты, открывает возможности понимания многих физических явлений и даёт новые сведения для анализа. Настоящее учебное пособие посвящено основным принципам действия стандартов частоты. Большинство опубликованных материалов, относящихся к этой проблеме, представлено в разрозненном виде в классических книгах, обзорных статьях или инженерных, физических, метрологических и астрономических научных журналах. В большинстве случаев эти научные труды написаны для специалистов и посвящены разработке того или иного узкого направления с характерной ограниченной областью приложения и соответствующими терминами. Данное учебное пособие рассчитано на широкую аудиторию читателей. В первую очередь, оно адресовано студентам, специализирующимся в лаборатории “Лаборатория перспективных квантовых стандартов частоты и систем точного времени”, однако оно может быть полезно и инженерам и физикам, интересующимся как собственно самим предметом, так и вводным обзором этого быстро развивающегося направления.

Список литературы

1. Сверхвысокочастотные и квантовые приборы: учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1-39 01 01 «Радиотехника» / сост. и общ. ред. В.Ф. Янушкевича. – Новополюцк: ПГУ, 2006. – 356 с.
2. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / (Springer Handbooks) 1st ed. 2017 Edition by Peter Teunissen (Editor), Oliver Montenbruck (Editor), ISBN: 978-3-319-42926-7, e-ISBN: 978-3-319-42928-1, DOI 10.1007/978-3-319-42928-1, Library of Congress Control Number: 2017936757.
3. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. –М. ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 512 с. – ISBN 978-5-9221-1096-9.
4. Якимов А.В. Введение в физику шумов. Учебное пособие. 2-е издание, переработанное и дополненное. // Фонд образовательных электронных ресурсов. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. Регистрационный номер 2935.22.04. Дата издания 27.06.2022. 103 с. <http://www.lib.unn.ru/students/src/2935.pdf> (Дата последнего обращения: 11.11.2023).
5. Ключев А.В., Якимов А.В. Шумы в радиоэлектронных приборах. Учебное пособие. – Нижний Новгород: ННГУ, 2023. – 65 с. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=858570&idb=0> (Дата последнего обращения: 11.11.2023).
6. N. F. Ramsey. Molecular beams (Oxford: Oxford University Press), 1956.
7. D. Kleppner, H.C. Berg, S.B. Crampton, N.F. Ramsey, R.F.C. Vessot, H.E. Peters, J. Vanier. «Hydrogen-maser Principles and Techniques», *Phys. Rev.*, vol. 138, 1965, pp. A972-983.

ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

Авторы:

Алексей Викторович Клюев
Константин Геннадьевич Мишагин
Виктор Александрович Поляков
Анастасия Антоновна Таланова
Аркадий Викторович Якимов

Учебное пособие

Компьютерная верстка – *А.В. Клюев*

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского».
603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.