

УДК 621.378.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ РЕЗОНАТОРА КВАНТОВОГО ВОДОРОДНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ВЕРШИНУ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ

Н. А. Демидов, В. А. Логачев

Приводятся результаты экспериментального исследования различных методов настройки резонатора квантового водородного генератора на вершину спектральной линии. Определяется степень воспроизводимости частоты в зависимости от применяемого метода настройки. Обсуждаются возможные причины несовпадения частот, получаемых при настройке разными методами. Предлагается новый, комбинированный метод настройки, обеспечивающий более высокую воспроизводимость частоты.

Одним из факторов, влияющих на частоту колебаний водородного генератора (ВГ), является эффект затягивания частоты генерации резонатором. Известно, что частота генерации ВГ определяется следующей формулой [1]:

$$f = f_{\lambda} - \frac{Q_p}{Q_{\lambda}}(f_{\lambda} - f_p), \quad (1)$$

где f_{λ} , f_p — частоты спектральной линии и резонатора соответственно, Q_{λ} , Q_p — их добротности. Отсюда видно, что важное значение имеет настройка резонатора на вершину спектральной линии излучения атомов. Настройка необходима по двум причинам: 1) при настройке воспроизводится одно и то же значение частоты колебаний (равное частоте спектральной линии f_{λ}), что является важнейшей метрологической характеристикой эталона частоты, 2) частота настроенного генератора не зависит от его параметров, следовательно, настроенный генератор будет обладать минимальной нестабильностью частоты.

Настройку резонатора ВГ на вершину спектральной линии можно производить по амплитуде генерации и путем модуляции добротности линии излучения Q_{λ} [2-5]. Последняя может осуществляться изменением интенсивности лучка, неоднородным магнитным полем и индукцированием зеемановских переходов в верхнем из используемых для генерации уровней. Представляет интерес исследование погрешности настройки при использовании каждого из указанных методов, а также сравнение частот, получаемых при настройке одного и того же ВГ различными методами. Такое исследование позволит оценить достоинства и недостатки каждого метода настройки и выбрать оптимальный вариант для конкретного применения ВГ.

На практике используются различные методы настройки [2-5], однако в литературе нет данных о сравнении частот настройки разными методами, а исследование погрешности настройки проведено с ВГ, имеющими плохую стабильность частоты $(5 \div 10) \cdot 10^{-13}$, что не позволяет полностью выявить все возможности методов настройки [5].

В настоящей работе излагаются результаты проведенного исследования трех, наиболее часто употребляющихся методов настройки (по амплитуде генерации, путем модуляции добротности линии интенсивно-

стью пучка и неоднородным магнитным полем). Определена воспроизводимость частоты и сравнены между собой частоты ВГ, настроенного разными методами. Все измерения были проведены на генераторах, имевших стабильность частоты не хуже $5 \cdot 10^{-14}$ в пределах нескольких часов, что обеспечивало высокую точность измерений.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ

Блок-схема аппаратуры, на которой производились измерения, приведена на рис. 1. При настройке частоты водородных генераторов раз-

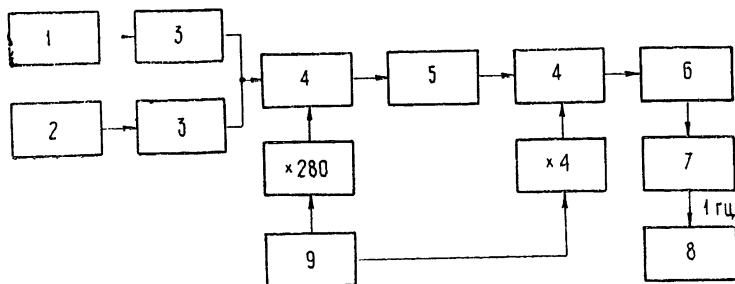


Рис. 1. Блок-схема аппаратуры, применяемой при настройке ВГ:

1—ВГ1 1420405751,6 гц, 2—ВГ2 1420405752,6 гц, 3—ферритовый вентиль, 4—смеситель, 5—УПЧ 20,405 Мгц, 6—УПЧ 405,7 кгц, 7—амплитудный детектор НЧ-фильтр, 8—частотомер ЧЗ-20, 9—кварцевый генератор 5 Мгц.

водились магнитным полем на 1 гц (обычно один работал при поле подмагничивания $0,7 \div 1,0$ мэ, другой — при поле около 20 мэ). Сигналы двух ВГ поступали на вход супергетеродинного приемника с двойным преобразованием частоты, гетеродинной мощностью в котором служила 280-я гармоника кварцевого генератора 5 Мгц. Чувствительность приемника была не ниже $3 \cdot 10^{-16}$ вт при полосе 2,5 кгц. Сигнал частоты биений (1 гц) выделялся амплитудным детектором, стоящим на выходе 2-го УПЧ, и после усиления подавался на электронно-счетный частотомер ЧЗ-20, который измерял период биений. Погрешность измерения, вносимая частотомером, при времени усреднения 10 сек не превышала $2 \cdot 10^{-13}$ (по отношению к частоте ВГ). Так как обычно проводилось не менее 10 замеров частоты, то величина погрешности измерения уменьшалась до $7 \cdot 10^{-14}$.

Для исследований применялись водородные генераторы, конструкция которых описана в [6]. Были приняты все меры для получения максимальной стабильности частоты ВГ — термокомпенсированный резонатор изготовлялся из италла, двухступенчатый электрический термостат поддерживал температуру резонатора постоянной с погрешностью $\sim 0,02^\circ\text{C}$. В результате принятых мер нестабильность частоты ВГ за время измерения (от нескольких минут до нескольких часов) была не более $5 \cdot 10^{-14}$.

2. НАСТРОЙКА РЕЗОНАТОРА ПО АМПЛИТУДЕ ГЕНЕРАЦИИ ВГ

Этот метод настройки является наиболее простым. В основу его положена зависимость амплитуды генерации ВГ от расстройки резонатора относительно линии излучения. Настройка резонатора по максимуму амплитуды генерации дает среднеквадратичную погрешность воспроизведения частоты $(2 \div 4) \cdot 10^{-11}$. Эта погрешность уменьшается, если воспользоваться методом «вилки» [3, 4]. В этом случае резонатор ВГ отстраивается в обе стороны от линии излучения до одинакового уровня мощности генерации (обычно в диапазоне $0,7 \div 0,5$ от макси-

мального уровня), и каждый раз измеряется период биений. За частоту настройки берется полусумма полученных частот. Среднеквадратичная погрешность воспроизведения частоты в этом случае составляет $(1,7 \div 2,5) \cdot 10^{-12}$.

Положительным свойством данного метода является то, что для его осуществления в принципе не требуется опорного ВГ, так как выставление частоты настройки можно производить по среднему положению перестроенного элемента. В этом случае к полученной погрешности добавится погрешность, связанная с выставлением частоты резонатора с помощью этого элемента. Подобный метод настройки может осуществляться с помощью схемы автоматики [7].

3. МЕТОД МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ ЛИНИИ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ПУЧКА

Из выражения (1) следует, что частота генерации зависит от добротности линии Q_L , когда $f_p \neq f_L$. Если же резонатор настроен на вершину линии, зависимость частоты генерации из-за изменения Q_L исчезает и это служит критерием настройки. В рассматриваемом методе добротность линии Q_L модулируется интенсивностью пучка атомов водорода. При возрастании потока атомов Q_L уменьшается из-за спин-обменной релаксации [1]. Кроме уширения спектральной линии, спин-обменное взаимодействие вносит сдвиг в генерируемую частоту, и выражение (1) с учетом этого сдвига принимает вид [8]

$$f_1 = f_L + \frac{Q_p}{Q_L} (f_p - f_L) - \frac{m \lambda f_L}{32 \sigma Q_L}, \quad (2)$$

где m — постоянная для данной конструкции ВГ величина, зависящая от его параметров (объема резонатора, колбы, добротности резонатора и т. д.), максимальное возможное значение m составляет 0,686, σ — сечение спин-обменного взаимодействия, λ — параметр сдвига из-за спин-обменного взаимодействия. Максимальный сдвиг частоты генерации из-за спин-обмена по теоретическим оценкам не превышает $5 \cdot 10^{-12}$.

Частота генерации не будет зависеть от Q_L , когда резонатор настроен на частоту

$$f_p = f_L + \frac{m \lambda f_L}{32 \sigma Q_p}. \quad (3)$$

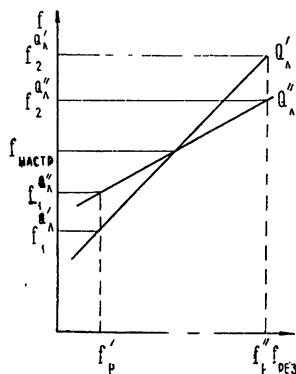


Рис. 2.

При этой частоте резонатора ВГ генерирует на несмещенной частоте f_L . Таким образом, при настройке ВГ методом модуляции добротности линии автоматически компенсируется сдвиг частоты генерации из-за спин-обменного взаимодействия атомов в колбе.

Настройка производится путем измерения разности частот генерации при изменении Q_L . На рис. 2 показана зависимость частоты генерации ВГ от расстройки резонатора при двух различных значениях Q_L . Частоту настроенного генератора можно определить по формуле

$$f_{настр} = f_1^{Q'_L} + \frac{(f_1^{Q''_L} - f_1^{Q'_L})(f_2^{Q'_L} - f_1^{Q'_L})}{(f_1^{Q''_L} - f_1^{Q'_L}) + (f_2^{Q'_L} - f_2^{Q''_L})}, \quad (4)$$

а также найти из следующего выражения:

$$f_{\text{настр}} = f_1^{Q'_l} + \frac{f_1^{Q''_l} - f_1^{Q'_l}}{R}, \quad (5)$$

где

$$R = \frac{Q''_l}{Q'_l} - 1. \quad (6)$$

Погрешность настройки определяется нестабильностью частоты ВГ за время измерения и величиной R :

$$\delta f_{\text{настр}} = \delta f_1^{Q'_l} + \frac{\delta (f_1^{Q''_l} - f_1^{Q'_l})}{R}. \quad (7)$$

В исследуемых водородных генераторах при изменении пучка в 4—7 раз величина параметра R получалась равной 0,3—0,8, поэтому вклад второго члена формулы (7) был преобладающим. Таким образом, максимальная величина параметра R , которая может быть достигнута при настройке методом модуляции Q_l , характеризует погрешность данного метода.

Экспериментально полученная воспроизводимость частоты составила $(1,5 \div 2) \cdot 10^{-13}$, что хорошо согласуется с теоретической оценкой. В настроенном положении частота ВГ в пределах $1 \cdot 10^{-13}$ не зависела от интенсивности пучка во всем диапазоне генерации. Таким образом, метод модуляции добротности линии интенсивностью пучка имеет погрешность на порядок меньше, чем метод настройки по амплитуде генерации. Для дальнейшего уменьшения погрешности настройки следует увеличить параметр R и повысить стабильность частоты ВГ.

4. МЕТОД МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ ЛИНИИ НЕОДНОРОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Добротность линии $Q_l = \pi f_l / (\gamma_0 + \gamma_m)$ (где γ_m — скорость релаксации, обусловленная неоднородным магнитным полем, γ_0 — скорость релаксации, обусловленная остальными процессами) можно модулировать также введением неоднородного магнитного поля в колбу. Зависимость γ_m от величины неоднородного магнитного поля в случае малых полей подмагничивания H_0 ($H_0 \ll 1/2 \pi \gamma_F \tau$) описывается выражением [9]

$$\gamma_m = \gamma_F^2 \overline{H_1^2} \frac{\tau}{1 + (2\pi\gamma_F H_0 \tau)^2}, \quad (8)$$

где $\gamma_F = 1,4 \cdot 10^6 \text{ гц} \cdot \text{э}^{-1}$ — гиромагнитное отношение, τ — среднее время между соударениями атома о стенки колбы, $\overline{H_1^2}$ — среднее значение квадрата поперечного магнитного поля по объему колбы. В случае больших полей ($H_0 \gg 1/2 \pi \gamma_F \tau$) скорость релаксации γ_m не может быть вычислена в общем виде, но для качественного рассмотрения можно пользоваться формулой (8).

Для уменьшения погрешности настройки необходимо получить как можно большую величину параметра R , что достигается введением больших неоднородностей поля. Ограничение на величину неоднородного поля накладывают снижение мощности генерации и сдвиги частоты спектральной линии f_l . Поэтому необходимо было найти оптимальную величину поперечного магнитного поля, которую можно вводить при настройке. С этой целью исследовался сдвиг частоты, получавшийся при настройке, и зависимость параметра R от H_1 , H_0 и интенсивности атомного пучка.

Для создания поперечного неоднородного магнитного поля использовались две дополнительные катушки по 5 витков каждая, токи в которых были включены навстречу. Катушки были намотаны на вакуумном колпаке резонатора и расположены симметрично относительно колбы на расстоянии 180 мм друг от друга. Ток через катушки не превышал 1 мА при работе ВГ в области малых полей подмагничивания ($H_0 \leq 5 \div 7$ мэ). На рис. 3а показана экспериментальная зависимость изменения частоты генерации при включении неоднородного поля Δf , пропорциональная параметру R , от тока в дополнительных катушках при различных интенсивностях пучка. Тангенс угла наклона прямых равен 2, что согласуется с формулой (8). Из рис. 3а видно, что максимальная величина Δf (соответственно параметр R) увеличивается с ростом интенсивности пучка. Верхние точки прямых соответствуют предельному уменьшению амплитуды генерации (в 4—5 раз), при которой система с учета периода биений работает еще нормально.

На рис. 3б изображена зависимость Δf от тока в катушках при разных его направлениях. Видно, что величина Δf не одинакова при разных направлениях тока, что, по-видимому, связано с поперечной неоднородностью подмагничивающего поля H_0 . По соответствующей разности в Δf можно оценить величину этой неоднородности.

Максимальная величина параметра R , которая достигалась при давлении в источнике пучка $p = 0,2 \div 0,3$ мм рт. ст. (прямая 3, рис. 3а), была 0,4—0,8 (для разных генераторов) и погрешность воспроизведения частоты была не больше чем в предыдущем методе. При уменьшении пучка величина параметра R уменьшалась (прямые 1, 2 при $p = 0,05; 0,12$ мм рт. ст. соответственно).

На рис. 4 показана экспериментальная зависимость тока в катушках, при котором происходит срыв генерации, I_0 , от подмагничивающего поля H_0 . При токе, равном I_0 , достигается максимальная скорость

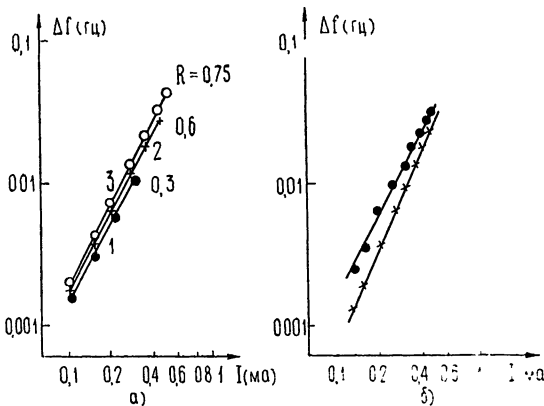


Рис. 3. Изменение частоты генерации в зависимости от тока в катушках, создающих неоднородное магнитное поле.

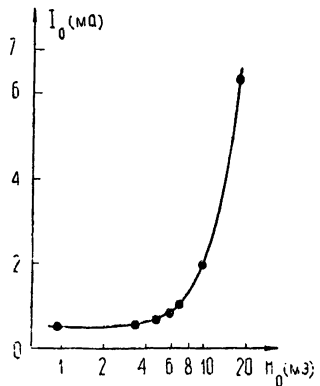


Рис. 4. Зависимость тока срыва генерации I_0 от поля подмагничивания H_0 .

релаксации (максимальный параметр R), величина которой мало зависела от H_0 в диапазоне $1 \div 20$ мэ. Видно, что для полей $H_0 \leq 7$ мэ I_0 почти не зависит от H_0 , а при дальнейшем увеличении H_0 ток срыва I_0 резко возрастает. Это явление хорошо согласуется с формулой (8). Оценки сдвигов спектральной линии f_L из-за введения неоднородного

поля показали, что при $H_0 < 7$ мэ они меньше $1 \cdot 10^{-14}$. При $H_0 \approx 13$ мэ величина вводимого неоднородного поля возрастает и сдвиги частоты становятся больше $1 \cdot 10^{-13}$. Таким образом, данный метод с успехом может применяться для настройки резонатора ВГ. Преимуществом этого метода является его меньшая инерционность, чем при модуляции пучка, и простота осуществления модуляции.

5. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД НАСТРОЙКИ

Погрешность настройки может быть уменьшена в 2—3 раза, если применить комбинацию двух методов модуляции ширины линии—интенсивностью пучка и неоднородным магнитным полем. Процесс настройки в этом случае происходит следующим образом: устанавливают нижний предел интенсивности пучка, измеряют частоту биений ВГ, затем устанавливают верхний предел интенсивности пучка (при этом мощность генерации возрастает) и в этот момент вводят неоднородное магнитное поле, дополнительно уширяя спектральную линию (мощность генерации снижается до прежней величины).

Легко показать, что параметр R в этом случае равен

$$R = R_n + R_m + R_n R_m,$$

где R_n , R_m — параметры настройки при модуляции Q_n пучком и магнитным полем соответственно.

6. СРАВНЕНИЕ ЧАСТОТ НАСТРОЙКИ ВГ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

При исследовании методов настройки ВГ было замечено, что частоты одного и того же ВГ, настроенного разными методами, не совпадают. Так, при настройке по амплитуде генерации (метод «вилки») частота ВГ оказалась меньше, чем при настройке методом модуляции добротности линии Q_n на величину $(2 \div 6) \cdot 10^{-12}$ (для различных генераторов). Это отличие может быть вызвано несколькими причинами: 1) изменением добротности резонатора при его перестройке штырем, 2) несимметричностью резонансной кривой резонатора, которая может быть искажена благодаря влиянию коаксиальной линии и нагрузки, 3) наличием сдвига из-за спин-обменного взаимодействия, который не компенсируется при настройке по амплитуде генерации. Так как влияние этих причин изменяется при изменении параметров генератора (добротности резонатора, положения штыря и т. д.), то при настройке по амплитуде генерации частота настройки будет зависеть от этих параметров.

На рис. 5 изображена экспериментальная зависимость разности частот ВГ, настроенного по амплитуде генерации и путем модуляции интенсивности пучка, от нагруженной добротности резонатора, которая изменялась путем изменения связи резонатора с нагрузкой. Цифры около экспериментальных точек указывают длину штыря настройки (в мм), выступающую внутрь резонатора, когда он настроен на вершину линии. Видно, что разность частот уменьшается с уменьшением свя-

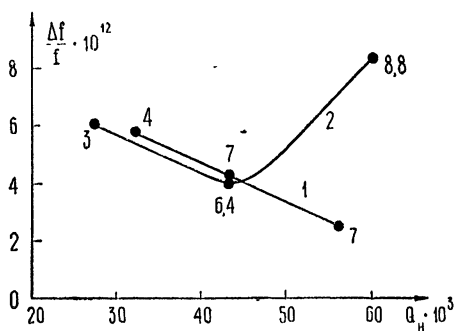


Рис. 5.

зи (кривая 1). Кривая 2, имеющая перегиб, снята для того же ВГ, но при других положениях штыря настройки резонатора. Измерение добротности резонатора в зависимости от положения штыря показало, что добротность практически не меняется при изменении длины штыря, выступающей внутрь резонатора, от 0 до 8 мм, а при дальнейшем изменении длины от 8 до 13 мм уменьшается на 3,6%. Точка перегиба на кривой рис. 4 также получается при длине штыря, большей 7 мм. Это подтверждает, что перегиб кривой рис. 4 вызван изменением добротности резонатора, связанным с изменением положения штыря. Следует отметить, что при настройке ВГ методом модуляции интенсивности пучка частота настройки не зависела от добротности резонатора.

Таким образом, метод настройки по амплитуде генерации имеет на порядок большую погрешность, чем другие методы, а частота настройки сдвинута относительно частоты линии, причем величина сдвига зависит от различных параметров и изменяется от генератора к генератору. Однако, несмотря на эти недостатки, благодаря возможности настройки этим методом без вспомогательного ВГ, в некоторых случаях он найдет применение.

Частоты одного и того же ВГ, настроенного модуляцией пучка и неоднородным магнитным полем, отличались на $(2-10) \cdot 10^{-13}$, причем для разных генераторов это отличие было разным по величине и знаку. Эта разница больше возможных сдвигов, вносимых при модуляции магнитным полем. Вероятно, она связана с релаксационными эффектами, зависящими от плотности атомов в накопительной колбе, не учтенных при выводе формулы (2).

Подводя итог рассмотрению методов настройки частоты ВГ, можно сделать следующие выводы:

1) обнаружена разница в частотах ВГ, настроенного модуляцией пучка и неоднородным магнитным полем (достигающая $1 \cdot 10^{-12}$), что много больше возможных сдвигов частоты линии из-за введения поля. Причины этой разницы пока не ясны;

2) частота ВГ, настроенного модуляцией пучка, не зависит от давления в источнике, что снижает требования к его стабилизации. Метод настройки ВГ неоднородным магнитным полем имеет преимущество в меньшей инерционности и простоте осуществления модуляции. Чувствительность настройки ВГ обоими методами примерно одинакова (получена воспроизводимость частоты $(1,5 \div 2) \cdot 10^{-13}$;

3) метод настройки по амплитуде генерации имеет среднеквадратичную погрешность $(1,5 \div 2,5) \cdot 10^{-12}$. Частота ВГ, настроенного этим методом, сдвинута относительно частоты спектральной линии на величину $(2 \div 6) \cdot 10^{-12}$. Величина сдвига зависит от ряда параметров ВГ: добротности резонатора, величины связи резонатора с нагрузкой, положения штыря настройки — и изменяется от генератора к генератору. Основным достоинством этого метода является его автономность, т. е. возможность настройки без вспомогательного ВГ;

4) предложенный новый способ настройки позволяет в 2—3 раза повысить воспроизводимость частоты ВГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Kleppner, H. M. Goldenberg, N. F. Ramsey, Phys. Rev., 126, № 2 603 (1962);
2. D. Kleppner et al., Phys. Rev., 138, № 4 A, A 972 (1965).
3. Г. А. Елкин, Л. Щербинин, Л. П. Елкина, Тр. ВНИИФТРИ, вып. 88, 148 (1966).
4. Н. А. Демидов, Л. М. Зак, В. Ф. Тимонин, Вопросы радиоэлектроники, сер. Радиоизмерительная техника, № 6 (1966).

5. H. G. Andresen, Proceedings of the 20-st Annual Frequency Symposium, 1966, p. 385.
6. Н. А. Демидов, Л. М. Зак, А. И. Лавров, В. А. Логачев, А. А. Ульянов, Г. М. Чернов, Б. П. Фатеев, Стандарт частоты водородный, Вопросы радиоэлектроники, сер. Радиоизмерительная техника, вып. 3 (1970).
7. Б. А. Гайгеров, Г. А. Елкин, Измерительная техника, № 6, 90 (1968).
8. S. B. Grampton, Phys. Rev., 158, № 1, 57 (1967).
9. I. Vanier, R. F. C. Vessot, IEEE, J. Quant. Electr., QE-2, № 9, 391 (1966).

Поступила в редакцию
29 июня 1970 г.

INVESTIGATION OF METHODS OF TUNING THE H LASER RESONATOR ON THE TOP OF THE SPECTRAL LINE

N. A. Demidov, V. A. Logachev

There are given the experimental results of investigating the different methods of tuning the hydrogen laser resonator on the top of the spectral line. The dependence of frequency reproducibility on the tuning method applied is determined. Possible causes of the frequency disagreement at different tuning procedures are discussed. A new combined method of tuning procedure providing the highest frequency reproducibility is suggested.
