

КРИОГЕННЫЕ РЕЗОНАТОРЫ В СХЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ

Совершенствование методов стабилизации частоты СВЧ генераторов, в том числе и с помощью криогенных резонаторов, позволяет не только повысить их долговременную стабильность, но и значительно снизить интенсивность шумовых составляющих в спектре СВЧ сигнала. В ряде случаев улучшение этих характеристик таково, что возникает необходимость в совершенствовании методов их измерения, поскольку существующие методики и аппаратура уже не могут обеспечить необходимую чувствительность. Особенно это касается составляющих спектра частотной модуляции (ЧМ), расположенных вблизи несущей частоты. Знание характера изменения ЧМ шумов вблизи несущей позволяет также более полно выявлять картину физических процессов, протекающих в автогенераторах.

Использование охлаждаемых и сверхпроводящих резонаторов (СПР) в схемах измерения ЧМ шумов предоставляет возможность проведения таких измерений.

Целью данной работы является анализ возможностей применения криогенных резонаторов в схемах измерения ЧМ шумов высокостабильных СВЧ генераторов. При этом основное внимание уделяется тем частям измерительных схем, где с помощью резонаторов осуществляется преобразование частотных флуктуаций СВЧ сигнала в амплитудные или в фазовые, а также схемам переноса частотных флуктуаций СВЧ сигнала в радиочастотный диапазон. Такое рассмотрение обусловлено тем, что последующие процедуры преобразований и измерений не связаны с характеристиками СВЧ резонаторов и широко описаны в литературе [1-5].

Наиболее простым методом измерения флуктуаций частоты является прямое частотное детектирование с помощью объемных резонаторов. При этом используются особенности их амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). АЧХ проходного резонатора с достаточной степенью приближения описывается формулой:

$$y(x) = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} = \frac{1}{\left[1 + \left(2Q \frac{\Delta f}{f_0}\right)^2\right]^{1/2}}, \quad (1)$$

где $x = 2Q \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta f}{\Delta f_0}$ – относительная расстройка; Q – добротность резонатора; $\Delta f = f - f_0$ – расстройка частоты генератора f относительно частоты резонатора f_0 ; Δf_0 – полуширина полосы пропускания резонатора.

Для $f > f_0$ функция $y(x)$ может быть представлена графиком на рис.1а.

При использовании резонатора в качестве частотного детектора (ЧД) необходимо обеспечить максимальное преобразование частотных флуктуаций в амплитудные. Для этого необходимо найти величину $dy(x)/dx$, характеризующую крутизну преобразования. График функции $dy(x)/dx$ также приведен на рис.1а. Видно, что максимальная крутизна преобразования обеспечивается при настройке резонатора на частоты, отстоящие от частоты генератора на величину $\pm \Delta f_0 / \sqrt{2}$. Максимальное значение крутизны или коэффициента преобразования в относительных единицах составляет величину $\leq 0,4$ и несимметрично изменяется при отклонении частоты f от значения $(f_0 \pm \Delta f_0 / \sqrt{2})$ в ту или другую сторону. Это говорит о том, что при частотном детектировании с помощью расстроенного резонатора будет происходить неполное преобразование ЧМ в АМ. В результирующем колебании будет существовать фазовый сдвиг между преобразованными в АМ колебаниями и несущей частотой, зависящий от девиации частоты. Однако главным условием использования расстроенного резонатора в качестве ЧД является превышение амплитуды преобразованных из ЧМ флуктуаций над соб-

ственными АМ флуктуациями исследуемого генератора. Это требование особенно ужесточается при исследовании высокостабильных генераторов со сниженными ЧМ шумами.

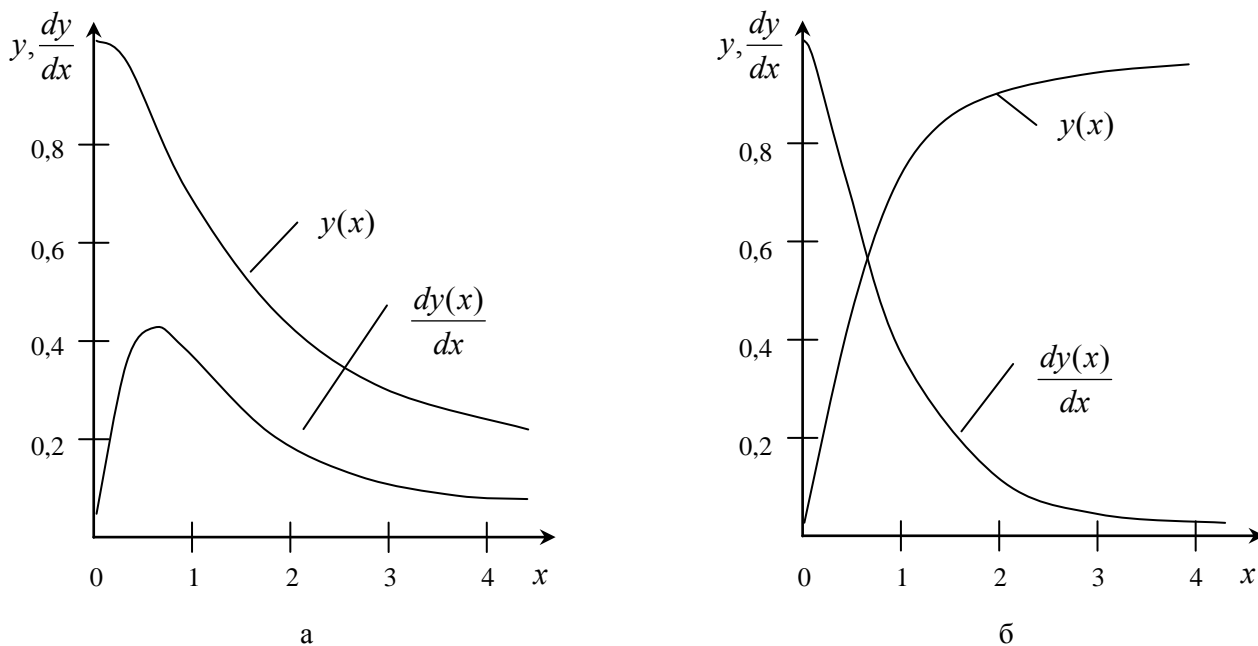


Рис.1

При анализе функций $y(x)$ и $dy(x)/dx$ можно утверждать, что абсолютная величина коэффициента преобразования ЧМ в АМ будет зависеть от величины добротности Q и для резонатора с добротностью $Q_1 > Q$ будет выше в Q_1 / Q (или в $\Delta f_0 / \Delta f_{01}$) раз.

Использование в качестве ЧД резонаторов, охлаждаемых до температур кипения жидкого азота, позволяет повысить коэффициент преобразования в несколько раз, а СПР – на несколько порядков. Стабильность параметров таких резонаторов обеспечивается автоматически за счет поддержания стабильного значения температуры кипения сжиженных газов, применяемых для их охлаждения.

В работах [6, 7] ЧД на СПР использовался для измерения частотных флуктуаций СВЧ генераторов, стабилизированных с помощью СПР. Чувствительность измерительной установки с СПР в качестве ЧД составляла порядка $-(140 \div 150)$ дБ/Гц на частотах анализа 20-1000 Гц. Нижнее значение частоты анализа ограничивалось характеристиками маломощного НЧ усилителя, включенного после амплитудного детектора. При использовании другого типа НЧ усилителя оно может быть снижено до единиц и даже долей Гц. Верхнее значение частоты анализа определяется инерционными свойствами резонатора. Предполагается, что максимальная крутизна преобразования ЧМ в АМ, не ограниченная инерционными свойствами резонатора, обеспечивается при частотах модуляции, меньших $F_{\max} = 2\Delta f_0 / 10$ [6]. При $F > F_{\max}$ крутизна преобразования падает и измерения для частот выше F_{\max} до $\sim 10F_{\max}$ могут быть произведены при тщательной калибровке измерительной установки за счет запаса по величине коэффициента преобразования, обусловленного высоким значением добротности ЧД на СПР. Однако, поскольку при использовании квазимонохроматического СВЧ сигнала основной интерес как раз представляют составляющие спектра ЧМ, расположенные вблизи несущей частоты, это ограничение, по-видимому, не так существенно.

В качестве ЧД может быть также использован и оконечно включенный объемный резонатор. АЧХ такого резонатора при коэффициенте связи, равном единице, описывается формулой:

$$y(x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} = \frac{Q \frac{\Delta f}{f_0}}{\left[1 + \left(2Q \frac{\Delta f}{f_0}\right)^2\right]^{1/2}}, \quad (2)$$

где $x = Q \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta f}{2\Delta f_0}$ – относительная расстройка.

График функции $y(x)$ для $f > f_0$ приведен на рис.1б. Там же приведен график функции $dy(x)/dx$, характеризующий крутизну преобразования ЧМ в АМ. Для частот $f < f_0$ аналогичные графики будут расположены симметрично относительно оси ординат.

Из рис.1б видно, что крутизна преобразования максимальна и близка к единице при малых девиациях частоты и достаточно велика даже на частотах девиации, сравнимых с полосой пропускания резонатора. Кроме того, преобразование ЧМ в АМ, в отличие от проходного расстроенного резонатора, носит симметричный характер. Абсолютное значение коэффициента преобразования ЧМ в АМ также будет расти пропорционально отношению добротностей. Следовательно, и в этом случае, преимущества использования охлаждаемых и сверхпроводящих резонаторов для исследования малошумящих СВЧ генераторов очевидны. Кроме того, при ЧД на основе оконечно включенного резонатора, амплитудный детектор работает в облегченном режиме, поскольку мощный (по сравнению с шумовыми составляющими) сигнал на несущей частоте режектируется объемным резонатором. При проведении измерений необходимо учитывать также то, что амплитуда анализируемого сигнала с уменьшением девиации частоты будет уменьшаться (см. рис.1б).

Практическая реализация устройства с АЧХ, описываемой формулой (2), является не простой технической задачей. В работе [2] для этого предлагается оконечно включенный резонатор (с устройством регулирования связи) подсоединять к одному из плечей ферритового циркулятора. Однако, как показано в [8], этого недостаточно, поскольку даже очень качественный ферритовый циркулятор не обеспечивает развязку лучше 40 дБ, а в полосе частот эта величина порядка 20-30 дБ, т.е. будет происходить прямое прохождение сигнала, минуя оконечно включенный резонатор. Практически исключить прямое прохождение сигнала на несущей частоте и значительно уменьшить прямое прохождение боковых составляющих можно с помощью методов амплитудно-фазовой компенсации [8]. Кроме того, АЧХ оконечно включенного резонатора сильно зависит от степени близости значения коэффициента связи к единице или в схемах с амплитудно-фазовой компенсацией – от точности настройки на определенное фиксированное значение коэффициента связи, которая не должна быть хуже 1%. Особенно это может сказаться на составляющих спектра ЧМ, расположенных вблизи несущей частоты. В работе [9] предложены устройства регулирования связи, которые обеспечивают плавную перестройку связи с резонатором в широких пределах, а в [10] рассматривается устройство, которое может служить прототипом ЧД на оконечно включенном СПР. Полоса анализируемых частот при этом существенно сужается, однако для СПР с добротностью $\sim 10^7$ может составлять величину от 10 до 10^3 Гц. Подавление мощности сигнала несущей частоты ≥ 90 дБ.

Вторая группа методов измерения частотных флуктуаций СВЧ генераторов основывается на использовании фазочастотных характеристик (ФЧХ) резонаторов. При отклонении частоты сигнала от резонансного значения он приобретает фазовый сдвиг φ , определяемый ФЧХ резонатора. При малых расстройках Δf для резонатора, включенного на проход, $\varphi = \arctg x = \arctg(2Q\Delta f / f_0) = \arctg(\Delta f / \Delta f_0)$; для оконечно включенного резонатора с коэффициентом связи, равном единице, $\varphi = \arctg(f_0 / 2Q_n \Delta f) = \arctg(\Delta f_0 / \Delta f)$. Последующее фазовое детектирование с помощью различных СВЧ мостовых схем позволяет преобразовать полученные сигналы в амплитудно-модулированные и затем по стандартной методике исследовать полученные спектры [1, 2, 4, 5]. Для этой группы методов применение криогенных, в том числе сверхпроводящих, резонаторов дает существенный выигрыш за счет более крутых, чем у обычных неохлаждаемых резонаторов, ФЧХ и возможности проводить анализ на частотах, близких к несущей частоте. Наиболее перспективным в данном случае может быть использование схемы оконечно включенного резонатора [10], поскольку позволяет сразу же в канале резонатора получить высококачественный двухполосный сигнал с подавленной несущей и соответствующими фазовыми сдвигами. Проблема измерения боковых полос очень низкого уровня при этом сохраняется из-за их малой амплитуды за счет поглощения в резонаторе. Тем не менее, диапазон анализируемых частот может составлять величину от 10 Гц до нескольких кГц для СПР с $Q \sim 10^7$.

Третья группа методов основывается на понижении частоты исследуемого СВЧ генератора с помощью гетеродина или исследовании частоты биений двух идентичных генераторов. Реализация данных методов затрудняется тем, что не всегда возможно найти гетеродин или второй генератор, которые по своим характеристикам превосходят или сравнимы со сверхмалошумящими СВЧ генераторами, такими как атомные стандарты или стабилизированные с помощью СПР [7].

Однако проблема переноса флуктуаций частоты СВЧ генератора в радиодиапазон, где методы исследования ЧМ шумов достаточно хорошо отработаны и существует стандартная серийно выпускаемая измерительная аппаратура, может быть решена с помощью измерительных схем, включающих высокочастотные резонаторы.

Устройство, блок-схема которого приведена на рис.2, позволяет производить перенос флуктуаций частоты СВЧ сигнала в область радиочастот без применения гетеродинного СВЧ генератора. Цифрами на схеме обозначены: 1 – смеситель; 2 – амплитудный модулятор; 3 – объемный резонатор; 4 – усилитель радиочастоты.

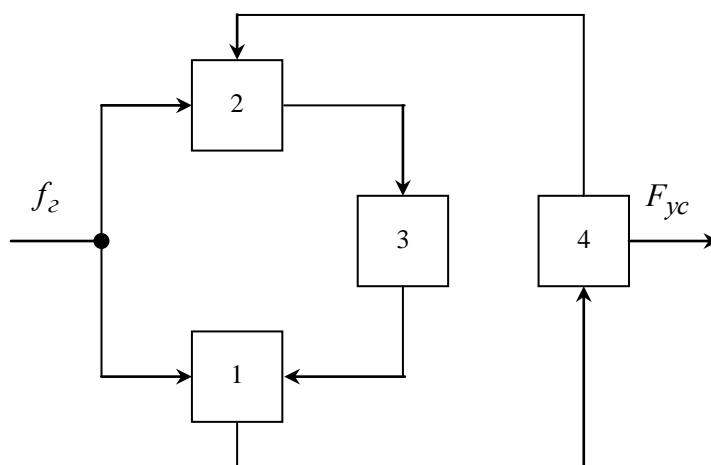


Рис.2

СВЧ сигнал с частотой f_2 подается на смеситель 1 и модулятор 2, между которыми включен резонатор 3, резонансная частота которого $f_p = f_2 - F_{yc}$ или $f_p = f_2 + F_{yc}$. Если к выходу смесителя подключить усилитель 4, настроенный на частоту F_{yc} , а его выход соединить с входом модулятора, то в цепи смеситель–усилитель–модулятор–резонатор–смеситель можно добиться самовозбуждения и генерируемая радиочастота F_{yc} будет функцией частоты СВЧ генератора f_2 .

В работе [11] показано, что для такого устройства будут выполняться следующие соотношения:

$$\Delta F_{yc} / \Delta f_p = \pm \tau_p / \tau_{yc}; \quad (3)$$

$$\Delta F_{yc} = \pm \frac{\Delta f_2}{1 + \tau_{yc} / \tau_p}, \quad (4)$$

где ΔF_{yc} , Δf_p , Δf_2 – флуктуации соответствующих частот; τ_p и τ_{yc} – крутизны фазовых характеристик резонатора и усилителя соответственно. Знак плюс соответствует настройке резонатора на нижнюю боковую частоту модуляции ($f_p = f_2 - F_{yc}$), а минус – на верхнюю ($f_p = f_2 + F_{yc}$).

Как следует из (3), флуктуации частоты генератора перераспределяются между флуктуациями радиочастоты F_{yc} и частоты f_p обратно пропорционально крутизнам фазовых характеристик усилителя и резонатора. Из (4) видно, что в случае $\tau_p \gg \tau_{yc}$ (охлаждаемый или сверхпроводящий ре-

зонатор), коэффициент преобразования абсолютных флуктуаций частоты f_2 во флуктуации частоты F_{yc} близок к единице.

Если теперь к выходу усилителя подключить измеритель флуктуаций радиочастоты, то можно измерить флуктуации частоты исследуемого СВЧ генератора.

Важной особенностью преобразователя частоты (рис.2) является то, что при наличии в усилителе 4 запаса по усилению, устройство будет устойчиво работать до тех пор, пока частота F_{yc} не выйдет за полосу пропускания усилителя 4, а так как при выполнении условия $\tau_p \gg \tau_{yc}$ имеется почти полное соответствие между изменениями F_{yc} и f_2 (4), то интервал допустимых изменений частоты f_2 определяется не полосой пропускания резонатора, а полосой пропускания усилителя. Если между смесителем и модулятором включить широкополосный усилитель, то можно значительно увеличить диапазон измеряемых флуктуаций СВЧ генератора практически без уменьшения степени преобразования Δf_2 в ΔF_{yc} (4).

На рис.3 приведена блок-схема еще одного преобразователя, позволяющего измерять флуктуации частоты высокостабильных СВЧ генераторов. Цифрами на схеме обозначены: 1 – смеситель; 2 – однополосный балансный модулятор; 3 – объемный резонатор; 4 – усилитель.

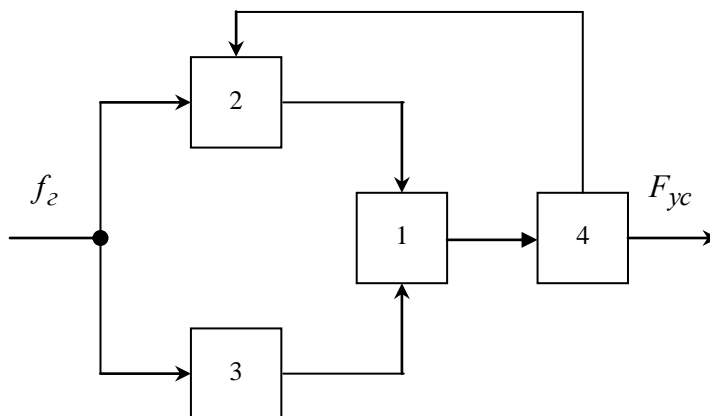


Рис.3

В [11] показано, что для такого преобразователя будет выполняться следующее соотношение:

$$\Delta F_{yc} = \mp (\tau_p / \tau_{yc}) \Delta f_2, \quad (5)$$

т.е. коэффициент преобразования флуктуаций равен (τ_p / τ_{yc}) и может составлять в случае использования криогенных резонаторов два-три порядка.

Устройство (рис.3) позволяет измерять очень малые флуктуации частоты, однако диапазон измеряемых флуктуаций и частот модуляции будет определяться полосой пропускания резонатора 3 и его инерционными свойствами.

Общим же недостатком этих преобразователей частоты является то, что используемые в них элементы (смесители, модуляторы, усилители) вносят свои шумовые составляющие (в основном амплитудной модуляции) в спектр исследуемого сигнала, что сказывается на чувствительности измерения ЧМ шумов сверхмалощумящих СВЧ генераторов и требует дополнительных мер по их снижению в аппаратуре, подключаемой к выходу преобразователей.

Суммируя проведенное рассмотрение можно утверждать, что использование криогенных резонаторов в схемах измерения частотных флуктуаций СВЧ сигналов позволяет значительно (от нескольких раз до нескольких порядков) повысить чувствительность измерений.

С помощью устройств с криогенными резонаторами (рис.2 и 3) можно осуществлять перенос частотных флуктуаций исследуемого СВЧ сигнала в радиодиапазон без применения специального вы-

сокостабильного СВЧ гетеродина. Эти устройства, на наш взгляд, представляются достаточно перспективными и в случае использования в них обычных высокочастотных резонаторов.

Список литературы: 1. Гроулинг, Хили. Аппаратура для измерения кратковременной стабильности частоты СВЧ источников. // ТИИЭР. 1966. Т.54. № 2. С.164-173. 2. Ondria J.G. A microwave system for measurements of AM and FM noise spectra. // IEEE Trans. MTT. 1968. V.15. № 9. PP. 767-781. 3. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М: Наука. 1968. 660 с. 4. Корнилов С.А., Савшинский В.А., Уман С.Д. Шумы клистронных генераторов малой мощности. М.: Сов. радио. 1972. 200 с. 5. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М.: Энергия. 1972. 456 с. 6. Дедик Ю.В., Иваницкий К.П., Каплун З.Ф. Частотный дискриминатор на сверхпроводящем резонаторе. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1969. Вып.10. С.88-90. 7. Бондаренко И.Н., Гнесь А.С., Менде Ф.Ф. Исследование спектральных характеристик сигналов СВЧ генераторов, стабилизированных сверхпроводящими резонаторами. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1982. Вып.1. С.13-16. 8. Бондаренко И.Н., Гнесь А.С., Покусай В.В. Режекторные фильтры СВЧ с амплитудно-фазовой компенсацией. // Радиотехника. 1984. Вып.71. С.104-108. 9. Бондаренко И.Н., Гнесь Н.О., Гнесь А.С. Регулируемые элементы связи на основе запердельных волноводов. // Радиотехника. 1986. Вып.76. С.114-119. 10. Бондаренко И.Н., Гнесь А.С. Сверхпроводящий режекторный фильтр СВЧ диапазона. // Радиотехника. 1987. Вып.82. С.124-130. 11. Менде Ф.Ф., Бондаренко И.Н., Трубицын А.В. Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы. К.: Наук. думка. 1976. 272 с.

Поступила в редколлегию