

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ДВУХ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ

Ф.Ф. Менде, Н.Н. Пренцлау, И.Н. Бондаренко,
И.Б. Иевенко, В.И. Бондаренко

Рассмотрена система стабилизации частоты двух СВЧ генераторов, частоты которых отличаются на значение промежуточной частоты.

Стабилизация осуществляется путем подачи сигналов с подстраиваемых генераторов через ответвители на смеситель, причем сигнал от одного из генераторов поступает через высокочастотный резонатор, служащий в системе эталоном частоты. Сигнал промежуточной частоты, выделенный на смесителях, подается на фазовый детектор и частотный детектор, напряжение с которых используется для подстройки стабилизируемых СВЧ генераторов.

Рассмотрена также система стабилизации двух генераторов СВЧ, разнесенных по частоте на промежуточную, в которой стабилизация одного генератора осуществлялась с помощью другого, уже стабилизируемого генератора.

Резонаторы термостабилизированы в среде жидкого азота. Относительная нестабильность частоты генераторов составила $10^{-6} - 10^{-8}$ в час.

При решении ряда технических задач, касающихся измерительной и экспериментальной техники, техники связи и др., необходимо наличие двух высокостабильных генераторов с постоянной разностью частот.

Обычно этот вопрос решается применением двух генераторов СВЧ с отдельными системами автоподстройки, что приводит к существенному усложнению схемы.

В настоящей работе описывается система совместной автоподстройки генераторов СВЧ, разнесенных по частоте на промежуточную, отличающаяся значительной простотой схемы. Блок-схема системы автоподстройки приведена на рис. 1.

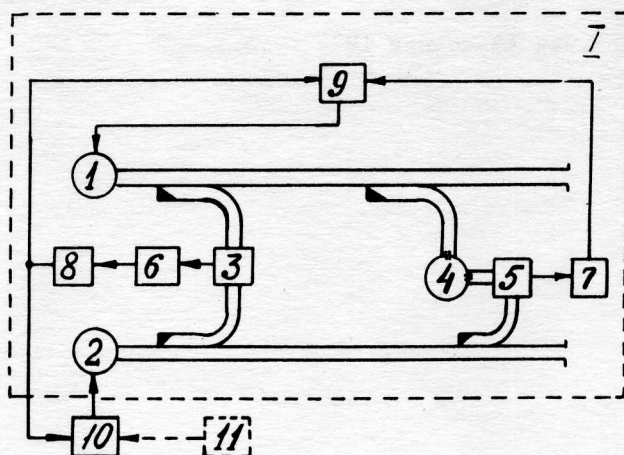


Рис. 1.

Система АПЧ включает в себя дискриминатор СВЧ с сигналом ошибки на промежуточной частоте $\bar{f}$, в состав которого входят: СВЧ генератор 2, смесители 3 и 5, резонатор 4, усилители промежуточной частоты 6 и 7, амплитудный ограничитель 8, фазовый детектор 9. Также в состав системы АПЧ входит частотный или фазовый детектор 10 и опорный кварцевый генератор промежуточной частоты 11.

Дискриминатор $\bar{f}$ используется для автоподстройки частоты генератора 1 по пассивному эталону — объемному резонатору 4, а частотный или фазовый детектор 10 для автоподстройки частоты генератора 2 по активному эталону (стабилизированному генератору 1). Принципиальной особенностью дискриминатора $\bar{f}$ является то, что в него входит вспомогательный генератор СВЧ как гетеродин. Работает дискриминатор $\bar{f}$ следующим образом: сигналы СВЧ от генераторов 1 и 2 поступают через направленные ответвители на смесители 3 и 5. При этом сигнал СВЧ от генератора 1 поступает на смеситель 5 через объемный резонатор 4, и следовательно, фаза и амплитуда его на выходе резонатора будут функционально связаны с расстройкой генератора 1 относительно резонансной частоты резонатора. В результате смещения сигналов на смесителях 3 и 5 выделяются напряжения промежуточной частоты, равной разности частот генераторов 1 и 2, при этом фаза и амплитуда напряжения промежуточной частоты на выходе смесителя 5 будут так же функционально связаны с расстройкой генератора 1 относительно резонансной частоты резонатора.

После усиления в усилителях 6 и 7 напряжения промежуточной частоты подаются на фазовый детектор 9. На выходе фазового детектора вырабатывается напряжение сигнала ошибки, величина и знак которого зависят от знака и величины изменения частоты генератора 1 относительно резонансной частоты объемного резонатора 4. Замыкая цепь управления частотой генератора 1, можно осуществить автоподстройку его по эталонному резонатору. Генератор 2 с помощью частотного или фазового детектора 10 можно подстраивать по стабилизированному генератору 1.

Таким образом, видно, что основным элементом в рассматриваемой системе АПЧ двух генераторов является дискриминатор $\bar{f}$ со вспомогательным генератором СВЧ 2. Сигнал ошибки в этом дискриминаторе вырабатывается на промежуточной частоте.

Описываемые в литературе [1, 2, 3] дискриминаторы с сигналом ошибки на промежуточной частоте имеют дополнительный радиочастотный генератор и амплитудный СВЧ модулятор. Специфика задачи стабилизации частоты двух генераторов СВЧ, разнесенных по частоте на промежуточную, позволяет осуществлять автоподстройку одного из генераторов с помощью дискриминатора $\bar{f}$ с сигналом ошибки на промежуточной частоте без применения радиочастотного генератора и амплитудного СВЧ модулятора, что приводит к упрощению схемы.

Рассмотрим более подробно работу системы АПЧ двух СВЧ генераторов.

Если линии передачи СВЧ сигналов от генератора 1 до смесителя 3 и от генератора 2 до смесителей 3 и 5 являются достаточно короткими и имеют малую фиксирующую способность $\partial \varphi / \partial f$, то для сигналов в плоскости диодов смесителей 3 и 5 можно записать:

$$\text{смеситель 3} \quad \begin{cases} e_{13} = E_{13} \cos \omega_1 t \\ e_{23} = E_{23} \cos \omega_2 t \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{смеситель 5} \quad \begin{cases} e_{15} = \operatorname{Re} E_{15} T(\alpha) = E_{15} T(\alpha) \cos[\omega_1 t - \theta(\alpha)] \\ e_{25} = E_{25} \cos \omega_2 t \end{cases} \quad (2)$$

где E_{13} , E_{23} , E_{25} — амплитуды сигналов СВЧ, поступающих от генераторов 1 и 2 на смесители 3 и 5 соответственно;
 E_{15} — амплитуда сигнала СВЧ генератора 1 на входе резонатора;

ω_1, ω_2 — угловые частоты генераторов 1 и 2 соответственно;
 T — комплексный коэффициент передачи резонатора;
 $T(\alpha), \theta(\alpha)$ — модуль и фаза комплексного коэффициента передачи резонатора;
 α — обобщенная расстройка генератора 1 относительно резонансной частоты резонатора.

Примем $\omega_2 > \omega_1$. Тогда в результате смещения на смесителях 3 и 5 будут выделяться напряжения промежуточной частоты Ω , равной разности частот $\omega_2 - \omega_1$. Для напряжений промежуточной частоты Ω на смесителях 3 и 5 можно записать:

$$u_{\Omega_3} = \alpha_3 E_{13} E_{23} \sin \Omega t, \quad (3)$$

$$u_{\Omega_5} = \alpha_5 E_{15} E_{25} T(\alpha) \sin [\Omega t + \theta(\alpha)], \quad (4)$$

где α_3 и α_5 — коэффициенты преобразования смесителей 3 и 5 соответственно.

После усиления сигнала усилителями 6 и 7 выражения для напряжений промежуточной частоты будут иметь вид:

$$u_{\Omega_3} = K_6 \alpha_3 E_{13} E_{23} \sin (\Omega t - \psi_6), \quad (5)$$

$$u_{\Omega_5} = K_7 \alpha_5 E_{15} E_{25} T(\alpha) \sin [\Omega t - \psi_7 + \theta(\alpha)], \quad (6)$$

где K_6, K_7, ψ_6, ψ_7 — модули и фазы комплексных коэффициентов передачи усилителей 6 и 7 соответственно.

Фазы комплексных коэффициентов усиления, определяющие фазовые сдвиги напряжений промежуточной частоты в усилителях 6 и 7, в общем случае будут зависеть от частоты Ω . В случае применения резонансных усилителей промежуточной частоты для ψ_6 и ψ_7 в окрестности Ω_p можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \psi_6 &= \tau_6 (\Omega - \Omega_{p_6}) \\ \psi_7 &= \tau_7 (\Omega - \Omega_{p_7}) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где τ_6, τ_7 — крутизны фазовых характеристик усилителей в окрестности резонансных частот для усилителей 6 и 7 соответственно;
 $\Omega_{p_6}, \Omega_{p_7}$ — резонансные частоты усилителей 6 и 7.

Напряжения промежуточной частоты Ω с выходов усилителей 6 и 7 подаются на фазовый детектор. При этом выходное напряжение усилителя 6 выполняет роль опорного сигнала при фазовом детектировании.

Из рассмотрения выражения (6) видно, что выходное напряжение усилителя 7 содержит в себе информацию о расстройке генератора 1 относительно резонансной частоты резонатора. Будем считать, что фазовый детектор имеет косинусоидальную нормированную характеристику, т.е.

$$u_{ф.д.} = \gamma u_1 u_2 \cos \varphi, \quad (8)$$

где U_1, U_2 - амплитуды сигналов, подаваемых на фазовый детектор ;
 γ - коэффициент передачи фазового детектора,
 φ - разность фаз подводимых напряжений.

Из выражений (5), (6), (7) следует :

$$U_{\varphi.g.} = K_6 K_7 \alpha_3 \alpha_5 \gamma E_{13} E_{23} E_{15} E_{25} T(\alpha) \cos[\psi_6 - \psi_7 + \Theta(\alpha)]. \quad (9)$$

В идеальном случае выходное напряжение фазового детектора должно зависеть только от расстройки генератора 1 относительно резонансной частоты резонатора ω_p . Из выражения (9) видно, что напряжение на выходе фазового детектора также зависит от амплитуд СВЧ сигналов, ответвляемых от генераторов 1 и 2 и от фазовых сдвигов в усилителях 6 и 7. Для исключения возможного влияния изменений амплитуд СВЧ сигналов в смесителе 3 на амплитуду напряжения промежуточной частоты, используемого в качестве опорного, на выходе усилителя 6 можно включить амплитудный ограничитель.

Рассмотрим влияние фазовых сдвигов в усилителях 6 и 7 на выходное напряжение фазового детектора ($U_{\varphi.g.}$). Из выражения (9) видно, что $U_{\varphi.g.}$ зависит от разности фазовых сдвигов в усилителях 6 и 7 - ($\psi_6 - \psi_7$). Для разности $\psi_6 - \psi_7$ можно записать (7)

$$(\psi_6 - \psi_7) = \tau_6 (\Omega - \Omega_{p6}) - \tau_7 (\Omega - \Omega_{p7}). \quad (10)$$

Если $\tau_6 = \tau_7$ и $\Omega_{p6} = \Omega_{p7}$, то разность $\psi_6 - \psi_7$ будет равна нулю в некотором интервале изменения промежуточной частоты Ω и напряжение фазового детектора будет определяться только фазой комплексного коэффициента передачи резонатора - $\Theta(\alpha)$. Практически более просто реализовать случай, когда

$$\begin{aligned} \Omega_{p6} &= \Omega_{p7}, \\ \tau_6 &\neq \tau_7. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда для работы дискриминатора $\bar{I}$ необходимо выполнение условия

$$\frac{\tau_6 - \tau_7}{\tau_p} \ll 1, \quad (11a)$$

где τ_p - крутизна фазовой характеристики резонатора.

В случае применения резонансных усилителей промежуточной частоты, т.е. выполнения соотношений (11) и (11a), а также при поддержании амплитуды сигнала на выходе усилителя 6 на постоянном уровне, для выходного напряжения фазового детектора можно записать

$$U_{\varphi.g.} = AT(\alpha) \cos[\Theta(\alpha)], \quad (12)$$

где

$$A = K_6 K_7 \alpha_3 \alpha_5 \gamma E_{13} E_{23} E_{15} E_{25} = \text{const.}$$

Для работы дискриминатора в окрестности нулевой расстройки нужно при помощи фазовращателя установить разность фаз между напряжениями промежуточной частоты, подаваемыми на фазовый детектор, равную $\pi/2$. Тогда выражение (12) примет вид

$$U_{\varphi.g.} = AT(\alpha) \sin[\Theta(\alpha)]. \quad (12a)$$

При включении резонатора по схеме на проход с одинаковыми связями по входу и выходу для $T(\alpha)$ и $\Theta(\alpha)$ можно получить выражения [4]

$$T(\alpha) = \frac{2z}{[(3z+1)^2 + \alpha^2]^{1/2}}, \quad (13)$$

$$\Theta(\alpha, z) = \alpha z \operatorname{ctg} \left[-\frac{\alpha}{(3z+1)} \right], \quad (14)$$

где $z = \frac{Q_0}{Q_{\text{вн}1}} = \frac{Q_0}{Q_{\text{вн}2}}$ — коэффициент связи резонатора с линией передачи по входу и выходу;
 Q_0 — ненагруженная добротность резонатора;
 $Q_{\text{вн}1}, Q_{\text{вн}2}$ — внешние добротности резонатора по входу и выходу;
 $\alpha = Q_0 \frac{2\Delta\omega_1}{\omega_p}$ — обобщенная расстройка, выраженная через ненагруженную добротность;
 $\Delta\omega_1 = (\omega_1 - \omega_p)$ — абсолютная расстройка генератора 1 относительно резонансной частоты резонатора ω_p .

Подставляя (13), (14) в выражения для $U_{\varphi.g.}(\alpha)$ (12), получим

$$U_{\varphi.g.}(\alpha, z) = A \frac{2z}{[(3z+1)^2 + \alpha^2]^{1/2}} \sin \left[\alpha z \operatorname{ctg} - \frac{\alpha}{3z+1} \right]. \quad (15)$$

Найдем выражение для крутизны частотной характеристики дискриминатора Γ

$$S_g = \frac{\partial U_{\varphi.g.}}{\partial \alpha} = A \frac{\partial T(\alpha)}{\partial \alpha} \sin[\Theta(\alpha)] + AT(\alpha) \frac{\partial}{\partial \alpha} \sin[\Theta(\alpha)]. \quad (16)$$

Подставив в (16) выражения для $\Theta(\alpha)$ и $T(\alpha)$ (13), (14) получим

$$S_g = A \frac{4\alpha z}{[(3z+1)^2 + \alpha^2]} \sin \left[\alpha z \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{3z+1} \right] - A \frac{2z(3z+1)}{[(3z+1)^2 + \alpha^2]^{3/2}} \cos \left[\alpha z \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{3z+1} \right]. \quad (17)$$

Из рассмотрения выражений (15) и (17) видно, что частотная характеристика дискриминатора симметрична относительно начала координат и имеет максимальную крутизну при $\alpha = 0$.

Из выражения (17) определим крутизну дискриминатора в окрестности $\alpha = 0$.

$$S_g(0) = -A \frac{2z}{(3z+1)^2}. \quad (18)$$

Соотношение (18) дает зависимость максимальной крутизны частотной характеристики дискриминатора от величины коэффициента связи. Найдем значение коэффициента связи по входу (выходу), при котором S_g будет максимальна. Из соотношения (18) имеем

$$\frac{\partial S_g(0)}{\partial z} = \frac{2-6z}{(3z+1)^3} = 0 \quad z = \frac{1}{3} < 1. \quad (19)$$

Следовательно, оптимальная величина коэффициента связи $z = \frac{1}{3} < 1$, что соответствует режиму недосвязи резонатора по входу и выходу. Учитывая (19), получим

$$S_{g \max \max} = -\frac{1}{6}A = -\frac{1}{6}K_6 K_7 \alpha_3 \alpha_5 \gamma E_{13} E_{23} E_{15} E_{25}. \quad (20)$$

Вид частотных характеристик дискриминатора приведен на рис. 2.

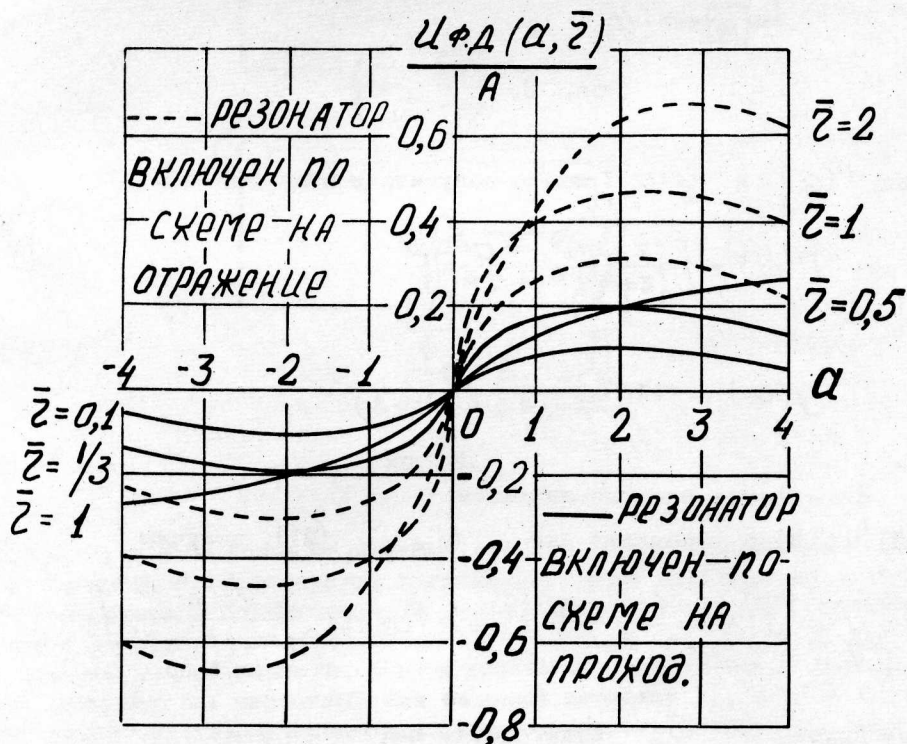


Рис. 2.

Осуществление автоподстройки частоты генератора 1 в данной системе возможно также при включении эталонного резонатора не на проход, а на отражение. Схема такой системы приведена на рис. 3. В этом случае СВЧ сигнал от генератора 1 поступает на смеситель 5 через циркулятор после отражения от резонатора. Для выходного напряжения фазового детектора, с учетом применимости приведенного выше анализа,

$$U_{\varphi.g} = A \Gamma(\alpha) \sin [\varphi(\alpha)], \quad (21)$$

где $\Gamma(\alpha)$ и $\varphi(\alpha)$ — модуль и фаза комплексного коэффициента отражения резонатора;
 A — имеет прежнее значение.

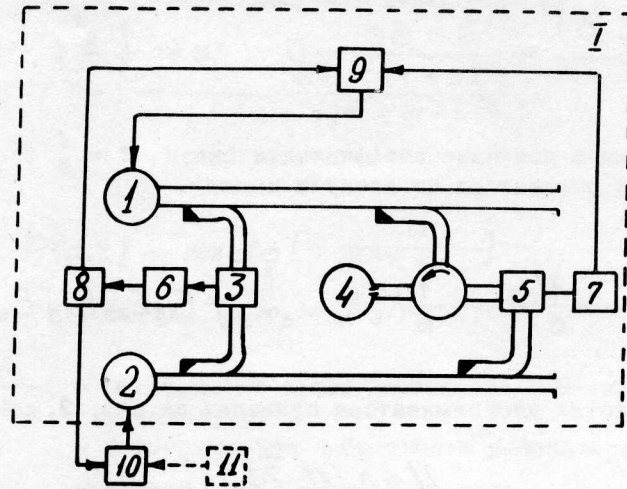


Рис. 3.

Выражения для $\Gamma(\alpha)$ и $\varphi(\alpha)$ можно получить в виде [4]

$$\Gamma(\alpha) = \left[\frac{(z-1)^2 + \alpha^2}{(z+1)^2 + \alpha^2} \right]^{1/2}, \quad (22)$$

$$\varphi(\alpha) = \alpha z \operatorname{ctg} \frac{2\alpha z}{\alpha^2 + (1-z^2)}, \quad (23)$$

где α и z — имеют прежние значения.

Подставив (22) и (23) в выражение для $U_{\varphi.g}$ (21), получим

$$U_{\varphi.g} = A \left[\frac{(z-1)^2 + \alpha^2}{(z+1)^2 + \alpha^2} \right]^{1/2} \sin \left[\alpha z \operatorname{ctg} \frac{2\alpha z}{\alpha^2 + (1-z^2)} \right]. \quad (24)$$

Выражение для крутизны S_g будет иметь вид

$$S_g = \frac{\partial U_{\varphi.g}}{\partial \alpha} = A \frac{4\alpha z}{[(z-1)^2 + \alpha^2]^{1/2} [(z+1)^2 + \alpha^2]^{1/2}} \cdot \sin \left[\alpha z \operatorname{ctg} \frac{2\alpha z}{\alpha^2 + (1-z^2)} \right] +$$

$$+ A \left[\frac{(z-1)^2 + \alpha^2}{(z+1)^2 + \alpha^2} \right]^{1/2} \cos \left[\alpha z \operatorname{ctg} \frac{2\alpha z}{\alpha^2 + (1-z^2)} \right] \left[\frac{2z(1-z^2) - \alpha^2}{[\alpha^2 + (1-z^2)]^2 + 4\alpha^2 z^2} \right]. \quad (25)$$

Из анализа выражений (24) и (25) видно, что частотная характеристика симметрична относительно начала координат и имеет максимальную крутизну при $\alpha = 0$. Приняв в (25) $\alpha = 0$, получим выражение, определяющее зависимость максимальной крутизны дискриминатора от величины связи ε .

$$S_g(0) = -\frac{2\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2} \cdot A. \quad (26)$$

Из (26) видно, что $S_g(0)$ будет иметь максимальное значение при $\varepsilon = 1$, что соответствует критической связи резонатора с линией передачи. Тогда

$$S_{g \max \max} = -\frac{1}{2} A. \quad (27)$$

Вид частотных характеристик дискриминатора при различных значениях ε при включении резонатора по схеме на отражение приведен на рис. 2.

Рассмотрим еще одну схему, позволяющую осуществить стабилизацию частоты двух СВЧ генераторов, генерирующих частоты, отличающиеся на значение промежуточной частоты.

Блок-схема изображена на рис. 4.

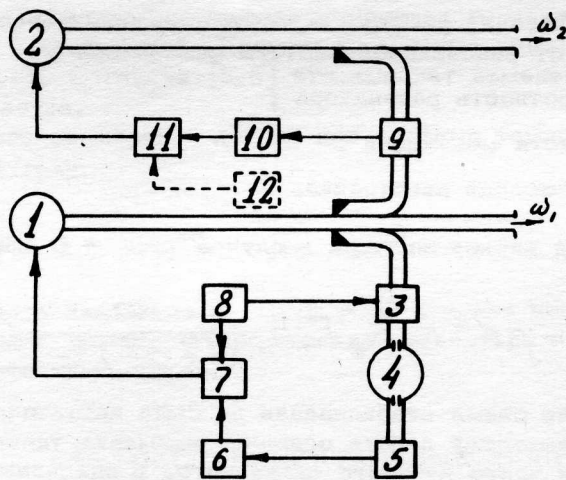


Рис. 4.

В основу схемы положен обычный принцип построения системы автоподстройки, когда стабилизируемый генератор подстраивается по стабильному источнику. Автоподстройка генератора 2 осуществляется следующим образом: СВЧ сигналы генераторов 1 и 2 через направленные ответвители поступают на смеситель 9, где выделяется сигнал промежуточной частоты. После усиления в усилителе 10 сигнал промежуточной частоты поступает на частотный или фазовый детектор 11, куда в случае применения фазового детектора также подается сигнал с опорного кварцевого генератора промежуточной частоты 12. Сигнал с выхода частотного или фазового детектора 11 используется для подстройки частоты генератора 2.

Основным элементом в данной системе является стабилизированный задающий СВЧ генератор 1, используемый в качестве эталонного генератора. Стабилизация частоты генератора 1 осуществляется следующим образом. Сигнал с генератора 1 через направленный ответвитель поступает на модулятор 3, куда также подается сигнал от низкочастотного генератора модулирующей частоты 8. Модулированный СВЧ сигнал через резонатор 4 поступает на смеситель 5. Частота модулирующего сигнала выбирается таким образом, чтобы боковые составляющие модуляции находились в полосе пропускания резонатора.

В случае отличия частоты подстраиваемого генератора 1 от значения резонансной частоты резонатора, на смесителе 5 выделяется сигнал с частотой, равной частоте модуляции, фаза которого зависит от расстройки. Этот сигнал после усиления в усилителе 6 поступает на фазовый детектор 7, куда также подается сигнал с низкочастотного генератора 8. На выходе фазового детектора появляется сигнал ошибки, который используется для подстройки частоты стабилизируемого генератора. Данная система была описана и проанализирована в работе [2]. Сигнал на выходе фазового детектора в данной схеме стабилизации будет описываться выражением

$$U_{\varphi g} = \frac{\beta K_0^2 K_1 K_2 E_1 E_0}{\sqrt{1 + a^2}} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (a_0 + a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + (a_0 - a)^2}} \right], \quad (28)$$

где β — коэффициент преобразования смесителя 5 ;
 K_0 — коэффициент, зависящий от связи резонатора с линией;
 K_1 — коэффициент передачи усилителя 6;
 K_2 — коэффициент передачи фазового детектора 7;
 E_0 — амплитуда СВЧ сигнала, подаваемого на модулятор 3 ;
 E_1 — амплитуда одной из боковых составляющих спектра модуляции;
 $a_0 = \frac{2\Omega}{f_{\text{рез}}} Q$ — обобщенная расстройка, обусловленная неравенством боковых частот резонансной частоты резонатора ;
 Q — добротность резонатора ;
 Ω — частота модуляции ;
 a — обобщенная расстройка.

Крутизну характеристики дискриминатора в случае $a = 0$ можно записать [2]

$$S_g = -\beta K_0^2 K_1 K_2 E_1 E_0 \frac{2a_0}{(1 + a_0^2)^{3/2}}. \quad (29)$$

Так как рассматриваемая схема стабилизации не была достаточно полно экспериментально изучена, то в настоящей работе основное внимание уделено ее экспериментальному исследованию. Как видно из всего сказанного, в описанных системах элементом, от которого в значительной степени зависит качество работы, является объемный резонатор, используемый как эталон частоты. Следовательно, к эталонности резонатора должны предъявляться жесткие требования. Для обеспечения эталонности необходимо ослабить воздействие внешних дестабилизирующих факторов (температуры, давления, влажности). От влияния давления и влажности на частоту резонатора можно избавиться путем помещения его в вакуумный объем.

Ослабление воздействия температуры на резонансную частоту резонатора можно достичь, с одной стороны, изготовлением его из материалов с малым коэффициентом линейного расширения, и, с другой стороны — его термостабилизацией. В качестве термостата в настоящей работе использован криостат, работающий при температурах жидкого азота. Термостабилизация резонатора при азотных температурах имеет следующие преимущества:

1. На температуру хладагента не влияет изменение температуры окружающей среды.
2. Коэффициент линейного расширения металлов при азотных температурах ниже, чем при комнатных, причем коэффициент линейного расширения тем меньше, чем ниже температура по сравнению с температурой Дебая. Выполняя резонатор с высокой температурой Дебая, можно достичь его эталонности при азотных температурах.
3. При понижении температуры уменьшаются потери энергии в резонаторе, что приводит к увеличению его добротности в 3–5 раз.

Оценим воздействие изменения температуры на резонансную частоту резонатора. Пусть температура окружающей среды меняется на 10°C , и резонатор изготовлен из латуни, коэффициент линейного расширения которой $\alpha_{\text{л}} = 19 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

Изменение резонансной частоты при изменении температуры можно оценить, пользуясь следующим соотношением [1]:

$$\Delta f = \alpha_f f \Delta t,$$

где Δt - изменение температуры,
 f - резонансная частота резонатора,
 α_f - температурный коэффициент частоты,
 Δf - изменение частоты резонатора при изменении его температуры на Δt .

Для объемных резонаторов можно принять $\alpha_f = \alpha_l$.

Тогда

$$\Delta f = \alpha_l f \Delta t,$$

т.е.

(30)

$$\Delta f = 19 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-10} = 3,8 \text{ мГц}$$

при работе в трехсантиметровом диапазоне и $\Delta f = 7,6 \text{ мГц}$ в полуторасантиметровом диапазоне.

В случае помещения резонатора в среду хладагента, например, в жидкий азот, изменения температуры окружающей среды на нем сказываться не будут. Однако на температуру азотной ванны влияет изменение атмосферного давления, т.к. емкость с азотом сообщается с атмосферой. Примем возможные изменения атмосферного давления $\pm 20 \text{ мм.рт.ст.}$. Согласно [5,6] это вызовет изменение температуры кипящего азота на $0,46$ градуса.

Коэффициент линейного расширения латуни при азотных температурах равен

$$\alpha_l = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град.}$$

Следовательно,

$$\Delta f = 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,46 \cdot 10^{10} = 15 \text{ кГц}$$

для трехсантиметрового диапазона и $\Delta f = 30 \text{ кГц}$ для полуторасантиметрового диапазона. Таким образом, видно, что помещение резонатора в криостат позволяет значительно повысить его эталонность.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Проверка работоспособности рассмотренных систем стабилизации частоты двух СВЧ генераторов, разнесенных по частоте на промежуточную, проводилась в трехсантиметровом диапазоне и полуторасантиметровом диапазоне волн по блок-схемам, изображенным на рис. 1,3 и 4. В эксперименте использовались цилиндрические резонаторы с нагруженной добротностью $1,5 \cdot 10^4$ в трехсантиметровом диапазоне и $\sim 10^4$ в полуторасантиметровом. Вид колебания H_{011} . Резонаторы были изготовлены из латуни и покрывались серебром. Резонатор помещался в криостат, где охлаждался до азотных температур. При проектировании к криостату предъявлялись следующие требования:

1. Исключение влияния уровня азота на стабильность частоты генератора.
2. Максимально возможное время работы его при единоразовой заливке.
3. Возможность установки криостата на движущихся объектах, для чего он должен сохранять работоспособность при наклонах до 90° относительно вертикального положения.
4. Надежное охлаждение резонатора.

Конструкция криостата приведена на рис. 5.

Криостат представляет собой вакуумированную азотную емкость 1, закрепленную в объеме 2 с помощью растяжек 3. Азотная емкость 1 снабжена камерой 4 для разме-

шения охлаждаемого резонатора 5. Резонатор 5 при помощи линий связи 6 подвешен к фланцу 7, который закреплен на камере 4. Так как резонатор находится в камере 4, температура вдоль линий связи при изменении уровня хладагента в криостате не изменяется. В этом случае влияние уровня жидкого азота из-за изменения длины линий связи на частоту генератора не сказывается [7]. Камера 4 прикреплена к азотной емкости 1 с помощью кармана 8. Такое крепление, с одной стороны, уменьшает теплоприток к хладагенту по стенкам камеры, и, с другой стороны, дополнительно уменьшает влияние уровня хладагента на частоту генератора из-за перераспределения температур в процессе работы.

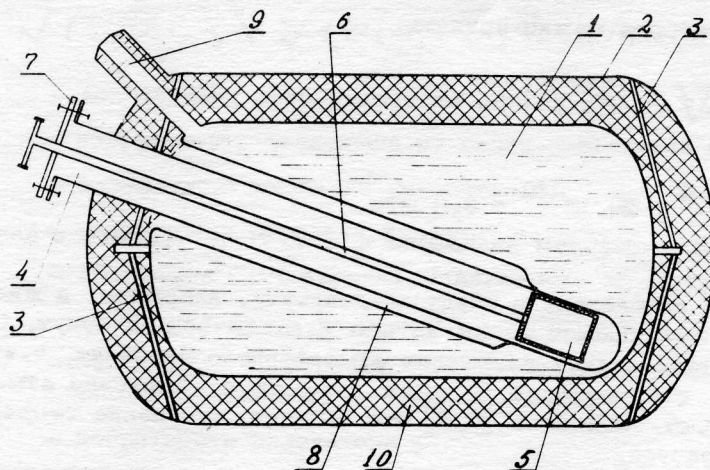


Рис. 5.

Камера 4 размещена под углом к оси емкости 1. Такое размещение ее обеспечивает надежное охлаждение резонатора 5 при любом наклоне криостата от 0 до 90° относительно вертикальной оси. Заливно-выпарные патрубки 9 размещены под углом 45° к оси емкости 1 и присоединены к месту перехода сферической части емкости 1 в цилиндрическую. Это предотвращает выливание азота из криостата при наклоне его на 90°. Для уменьшения теплопритока излучением к азотному объему вакуумное пространство между емкостью 1 и вакуумным объемом 2 заполнено экранно-вакуумной изоляцией 10.

Азотная емкость имеет объем ~ 100 л.

Зависимость времени работы криостата от углов наклона приведена на рис. 6.

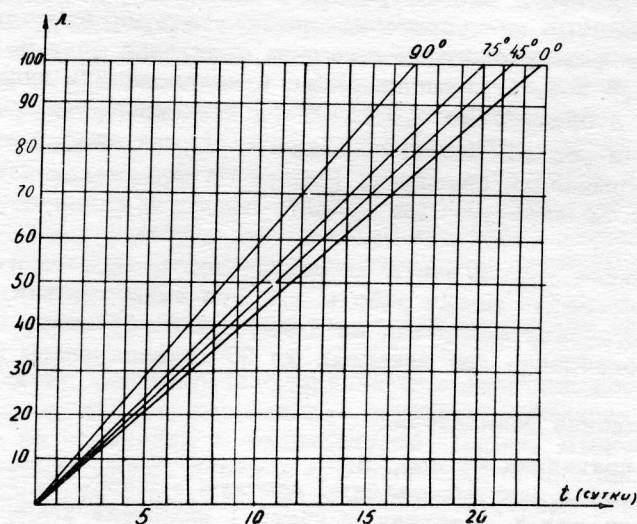


Рис. 6.

Изменение резонансной частоты резонаторов при охлаждении от комнатных до азотных температур составило величину 35 мгц и 70 мгц соответственно в трехсантиметровом и полуторасантиметровом диапазоне. Изменение частоты помещенного в криостат резонатора трехсантиметрового диапазона при изменении давления под азотом на 40 мм.рт.ст. составило величину ~ 10 кгц.

В качестве генераторов СВЧ использовались отражательные клистроны трехсантиметрового диапазона с выходной мощностью порядка 60 мвт и клистроны полуторасантиметрового диапазона с выходной мощностью 10 мвт.

Усилители промежуточной частоты были собраны по схеме на взаиморасстроенных контурах и имели регулируемый коэффициент усиления, максимальное значение которого составляло величину ~ 60 дб. Резонансные частоты усилителей были равны 3 мм при полосе пропускания 0,5 мгц. В качестве фазового детектора использовался пентод 6Ж2П, на первую сетку которого подавался сигнал с усилителя 7, а на третью — с усилителя 6, в случае схем, изображенных на рис. 1 и 3.

В схеме, изображенной на рис. 4, на первую сетку подавался сигнал с усилителя 6, настроенного на частоту 0,9 мгц, а на третью — с генератора 8. Соответственно для фазового детектора 11 на первую сетку с усилителя 10, а на третью — с опорного генератора 12. Частотный детектор был собран по схеме на взаиморасстроенных контурах с последующим усилением сигнала расстройки по постоянному току. Опорный кварцевый генератор промежуточной частоты имел относительную нестабильность за час — 10^{-6} .

Внешний вид системы стабилизации частоты двух СВЧ генераторов показан на рис. 7.

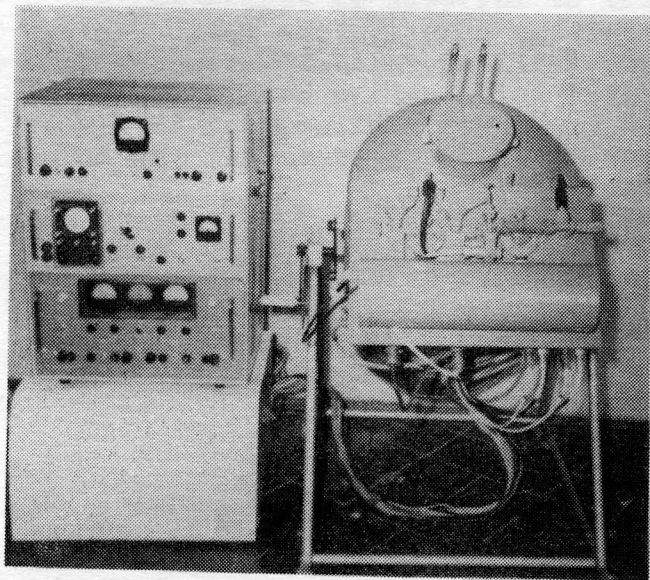


Рис. 7.

Коэффициент стабилизации системы автоподстройки клистрона 1 определялся методом измерения ухода частоты клистрона при изменении напряжения питания отражателя клистрона 1 в режимах РРЧ и АПЧ на одно и то же значение.

Измерение коэффициента стабилизации второго клистрона проводилось этим же методом, но при одновременном изменении напряжений отражателей обоих клистронов. Частоты подстраиваемых генераторов измерялись с помощью комплекта приборов для измерения частоты 40-7 для трехсантиметрового диапазона и с помощью 40-7 и переносчика частоты 46-13 с преобразователем частоты 46-15 для полуторасантиметрового диапазона.

Показания приборов записывались цифропечатающей машиной.

Экспериментальные данные приведены в таблице.

Таким образом, в работе приведены теоретические и экспериментальные исследо-

вания двух типов систем стабилизации частоты СВЧ генераторов, разнесенных на промежуточную частоту. При этом в качестве эталона частоты использовались объемные резонаторы, термостабилизированные путем помещения их в криостат, работающий при температуре жидкого азота.

Показано, что в системе как первого, так и второго типа могут быть получены высокие коэффициенты стабилизации, а следовательно, малые относительные нестабильности частоты. Особенно перспективной является система стабилизации второго типа, которая дает возможность снизить относительные нестабильности частоты до величин порядка 10^{-8} .

	СИСТЕМА 1				СИСТЕМА 2	
	резонатор на проход		резонатор на отражение			
	3 см	1,5 см	3 см	1,5 см	3 см	1,5 см
1. Коэффициенты стабилизации системы АПЧ первого генератора.	400	200	700	470	3000	1500
2. Относительная нестабильность частоты первого генератора за 1 час.	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	10^{-8}	$5 \cdot 10^{-8}$
3. Коэффициенты стабилизации системы АПЧ второго генератора.	100	180	110	180	100	180
4. Относительная нестабильность частоты второго генератора за 1 час.	$4 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
5. Относительная нестабильность частоты второго генератора за 1 час при замене частотного детектора на фазовый.	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	10^{-8}	$5 \cdot 10^{-8}$

ЛИТЕРАТУРА

1. С.И.Бычков, Н.И.Буренин, Р.Т.Сафаров, Стабилизация частоты генераторов СВЧ, "Советское радио", 1962.
2. Ф.Ф.Менде, Н.Н.Пренцлау, В.М.Дмитриев, "Радиотехника", 26, № 1, стр.51-56, 1971.
3. Ф.Ф.Менде и др. ПТЭ, № 3, стр.196-197, 1967.

4. Дж. Альтман, Устройства СВЧ. "Мир", М., 1968.
5. А.Роуз-Инс, Техника низкотемпературного эксперимента. "Мир", М., 1966.
6. Р.Б.Скотт, Техника низких температур, ИЛ, М., 1962.
7. Н.Н.Пренцлау, Ф.Ф. Менде, И.Т.Баранов, Сб. "Вакуумная и криогенная техника", вып. 2, ФТИНТ АН УССР, Харьков, 1972.

FREQUENCY STABILIZATION SYSTEM OF TWO ULTRA-HIGH FREQUENCY GENERATORS

F.F.Mende, N.N.Prentslau, I.N.Bondarenko, I.B.Ievenko,
V.I.Bondarenko

The system of frequency stabilization for two ultra-high frequency generators the frequencies of which differ by the intermediate frequency value, has been considered.

Stabilization is realized by means of supplying signals from tuned generators through directional couplers to the mixer; the signal from one of generators is supplied through the high quality resonator serving as a frequency standard in the system. The intermediate frequency signal detected at the mixers is supplied to the phase discriminator and frequency detector, the voltage from the latter ones being used for tuning ultra-high frequency generators under stabilization.

The stabilization system of two ultra-high frequency generators, distanced apart by the intermediate frequency, has also been considered, when stabilization was performed by means of the other already stabilized generator.

The resonators have been thermally stabilized in liquid nitrogen medium.

Relative instability of generator frequencies was 10^{-6} - 10^{-8} p.h.

Получена редколлегией 14 ноября 1972 года.