

ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ СВЧ ГЕНЕРАТОР СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ РЕЗОНАТОРОМ

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

Описан высокостабильный перестраиваемый СВЧ генератор со сверхпроводящим резонатором, который позволяет получать относительные нестабильности частоты порядка 10^{-10} . Указанная стабильность достигается в любой точке в диапазоне перестройки, равном 100 мГц. Элементы СВЧ тракта и сверхпроводящий резонатор при этом не перестраиваются. Приведены основные соотношения, характеризующие работу генератора.

СВЧ генераторы получили широкое распространение в различных областях науки и техники. Улучшение качества работы многих радиотехнических систем в значительной степени определяется совершенствованием тех или иных параметров сверхвысоко-частотных генераторов. Одним из наиболее важных параметров, который постоянно совершенствуется и улучшается, является стабильность частоты. Причем, многие системы нуждаются в высокой стабильности частоты не только в определенных заданных точках, но и в некотором диапазоне ее перестройки.

Наиболее гибким и широко распространенным методом стабилизации частоты является метод ее автоматической подстройки. Существует большое количество схем, позволяющих осуществлять автоматическую подстройку частоты СВЧ генераторов [1-4]. Однако до сих пор представляет серьезную трудность вопрос обеспечения высокой стабильности при перестройке частоты в некотором диапазоне.

В настоящей работе рассмотрена система фазовой автоподстройки частоты (ФАП) СВЧ генератора, позволяющая осуществлять стабилизацию его колебаний в некотором диапазоне частот. Описанная система является результатом дальнейшего совершенствования системы ФАП с пассивным эталоном, описанной в работе [3]. Блок-схема изображена на рис. 1. Основными элементами являются: 1 - клистронный генератор;

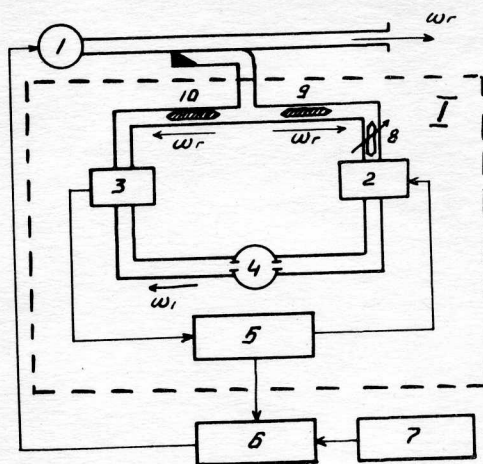


Рис. 1.

2 - амплитудный модулятор; 3 - смеситель; 4 - эталонный объемный резонатор; 5 - широкополосный усилитель; 6 - фазовый детектор; 7 - перестраиваемый опорный генератор; 8 - фазовращатель; 9, 10 - ферритовые вентили.

В рассматриваемой системе флуктуации частоты подстраиваемого СВЧ генератора переносятся преобразователем 1 (обведен на блок-схеме пунктирной линией) на промежуточную частоту Ω (ω_r). Совместив преобразователь 1 с перемножителем двух колебаний, т.е. с фазовым детектором, на который подаются колебания от эталонного радиогенератора, можно осуществить автоподстройку частоты СВЧ генератора.

Проведем анализ работы системы стабилизации. Сигнал с частотой подстраиваемого генератора подается на модулятор 2 и смеситель 3, между которыми включен эталонный резонатор 4. Пусть на модулятор подается напряжение, изменяющееся по закону

$$\cos(\Omega t + \varphi) = \cos \psi.$$

На выходе модулятора получим спектр из трех частот

$$\omega_r - \Omega, \quad \omega_r + \Omega, \quad \omega_r.$$

Если резонатор 4 настроен на одну из боковых частот (для определенности на нижнюю: $\omega_r = \omega_r - \Omega$), тогда сигнал, подаваемый на смеситель, в предположении, что модулирующая частота Ω значительно больше полосы пропускания резонатора, можно записать в виде

$$e(t, \alpha) = E_{or} \left\{ \beta \frac{m}{2} T(\alpha) \sin[\omega_r t - \Theta(\alpha) - \psi] + \sin \omega_r t \right\}, \quad (1)$$

где $\alpha = Q_0 \frac{2\Delta\omega_1}{\omega_r}$ - обобщенная расстройка;

$\Delta\omega_1 = \omega_r - \Omega - \omega_r$ - абсолютная расстройка СВЧ генератора относительно резонансной частоты резонатора;

$\omega_1 = \omega_r - \Omega$ - частота, проходящая через резонатор;

E_{or} - амплитуда СВЧ сигнала, подводимого к модулятору 2 и смесителю 3;

$\frac{m}{2}$ - коэффициент амплитудной модуляции;

$T(\alpha)$ и $\Theta(\alpha)$ - модуль и фаза комплексного коэффициента передачи резонатора соответственно;

Q_0 - ненагруженная добротность резонатора.

Предположим, что частота Ω неизменна, а резонатор высокоэталонный, тогда обобщенная расстройка $\alpha \sim \Delta\omega_r$ определяется только частотой генератора ω_r . Если считать детектор смесителя квадратичным, то сигнал промежуточной частоты на выходе смесителя можно записать в виде

$$e'(t, \alpha) = \alpha \beta \frac{m}{2} E_{or}^2 T(\alpha) \cos[\psi + \Theta(\alpha)], \quad (2)$$

где α - коэффициент преобразования смесителя.

Из выражения (2) видно, что фаза и амплитуда сигнала промежуточной частоты зависят от расстройки, т.е. фаза и амплитуда сигнала на выходе смесителя определяются частотой СВЧ генератора ω_r . Если выход смесителя подсоединить ко входу усилителя радиочастоты Ω , а к выходу этого усилителя подсоединить амплитудный модулятор, то при соблюдении условия баланса фаз и амплитуд система воз-

будится на частоте, лежащей в полосе пропускания усилителя 4. Известно [1], что зависимость фазового сдвига в одном из элементов кольца автогенерации от какого-либо параметра обуславливает зависимость генерируемой частоты от этого же параметра. В данном случае при изменении частоты генератора ω_r происходит фазовый сдвиг в цепи обратной связи (в цепи резонатора, выражение (2)), что ведет к изменению генерируемой частоты Ω , т.е. упомянутым параметром в этом случае является частота СВЧ генератора ω_r .

Следовательно, генерируемая преобразователем 1 частота Ω будет функционально связана с частотой СВЧ генератора ω_r , т.е. промежуточная частота является функцией расстройки $\alpha \sim \omega_r - \omega_p$, а при высокой добротности и эталонности резонатора 4 все флуктуации частоты ω_r будут однозначно переноситься на частоту Ω (ω_r).

Учитывая принцип переноса фаз, запишем фазовые соотношения, имеющие место в системе при самовозбуждении

$$\begin{cases} \varphi_{43} \pm \varphi_{35} = \varphi_{r3} \\ \varphi_{24} \pm \varphi_{52} = \varphi_{r2} \\ \varphi_{43} - \varphi_{24} = \tau_p \Delta \omega_r \\ \varphi_{52} - \varphi_{35} = \tau_y \Delta \Omega \end{cases} \quad \Delta \omega_r \pm \Delta \Omega = \Delta \omega_r, \quad (3)$$

где буквами φ обозначены фазы соответствующих сигналов, причем первый индекс показывает, от какого элемента поступает сигнал, а второй куда он поступает;

τ_p — крутизна фазовой характеристики резонатора 4;

τ_y — крутизна фазовой характеристики усилителя, которая будет определяться временем задержки в случае применения нерезонансного усилителя;

Знак плюс соответствует настройке резонатора на нижнюю боковую, а минус — на верхнюю.

Если принять, что фазовые характеристики и электрические длины линий передачи СВЧ сигнала от генератора 1 до модулятора 2 и смесителя 3 идентичны, тогда $\varphi_{r2} = \varphi_{r3}$ на любой частоте ω_r , т.е. фазовые соотношения в преобразователе 1 в режиме возбуждения будут определяться только τ_p и τ_y .

Путем исключения фаз из системы уравнений (3) можно получить следующие соотношения:

$$\frac{\Delta \Omega}{\Delta \omega_r} = \pm \frac{\tau_p}{\tau_y}, \quad (4)$$

$$\Delta \Omega = \frac{1}{1 + \tau_y/\tau_p} \cdot \Delta \omega_r. \quad (5)$$

Знак плюс соответствует настройке резонатора на нижнюю боковую, а минус — на верхнюю.

Как следует из соотношения (4), флуктуации частоты генератора перераспределяются между флуктуациями частоты Ω и частоты ω_r обратно пропорционально крутизнам фазовых характеристик усилителя частоты Ω и резонатора.

Из соотношения (5) видно, что в случае, когда $\tau_p \gg \tau_y$, коэффициент преобразования абсолютных флуктуаций частоты ω_r в флуктуации частоты Ω , равной $\frac{1}{1 + \tau_y/\tau_p}$, близок к единице, т.е. почти вся абсолютная нестабильность $\Delta \omega_r$ СВЧ генератора переносится в диапазон радиочастот.

Итак, если перестраивать генератор СВЧ, то частота возбуждения преобразователя 1 будет изменяться согласно выражению (5), пока будут выполняться условия для самовозбуждения.

В случае применения в преобразователе 1 широкополосного усилителя радиочастоты, фазовый сдвиг в цепи усиления будет определяться временем задержки в ней.

Определим ширину зоны возбуждения преобразователя при перестройке СВЧ генератора, приняв, что фазовые соотношения в системе определяются только временем задержки широкополосного усилителя и фазовой характеристикой резонатора во всем диапазоне перестройки СВЧ генератора.

Запишем условия самовозбуждения:

$$\dot{K}_{yc} \dot{K}_{o.cb.} = 1 \quad \text{или} \quad \begin{cases} |\dot{K}_{yc}| \cdot |\dot{K}_{o.cb.}| = 1 \\ \varphi_{yc} + \varphi_{o.cb.} = 2\pi n, \end{cases} \quad (6)$$

где $\dot{K}_{yc}$, $\dot{K}_{o.cb.}$ — комплексные коэффициенты передачи усилителя и цепи обратной связи;

$|\dot{K}_{yc}|$, $|\dot{K}_{o.cb.}|$, φ_{yc} , $\varphi_{o.cb.}$ — модули и фазы коэффициентов передачи усилителя и цепи обратной связи соответственно.

Для данной системы можно записать

$$|\dot{K}_{o.cb.}| = T(\alpha) \alpha \beta \lambda = \alpha \beta \lambda \gamma \frac{1}{(1 + \alpha^2)^{1/2}}, \quad (7)$$

где $T(\alpha)$ — модуль комплексного коэффициента передачи резонатора в цепи обратной связи;

α, β — коэффициенты преобразования смесителя и модулятора соответственно;

λ — коэффициент, зависящий от амплитуд сигналов СВЧ генератора на смесителе и на модуляторе;

α — обобщенная расстройка.

В случае малой связи резонатора с линией передачи $T(\alpha) = \gamma \frac{1}{[1 + \alpha^2]^{1/2}}$,

где γ — коэффициент, зависящий от коэффициента связи;

$z = \frac{Q_0}{Q_{\text{вн}_1}} = \frac{Q_0}{Q_{\text{вн}_2}}$ — коэффициент связи резонатора по входу и выходу;

Q_0 — ненагруженная добротность резонатора;

$Q_{\text{вн}_1}$, $Q_{\text{вн}_2}$ — внешние добротности резонатора по входу и выходу.

Фаза в цепи обратной связи ($\varphi_{o.cb.}$) определяется фазой комплексного коэффициента передачи резонатора, и для нее в случае малой связи с резонатором можно записать

$$\varphi_{o.cb.} = \theta(\alpha) \approx \alpha \operatorname{arctg}(-\alpha). \quad (8)$$

Модуль комплексного коэффициента передачи широкополосного усилителя принимаем независимым от частоты во всей полосе пропускания, а фаза будет линейно зависеть от частоты генерации, т.е.

$$\varphi_{yc} = \Omega(\omega_r) \tau_3, \quad (9)$$

где τ_3 — время задержки усилителя.

Из выражения для модуля комплексного коэффициента передачи резонатора $T(\alpha)$ следует, что обратная связь будет максимальна при $\alpha = 0$, т.е. при $\omega_1 = \omega_p$. Предположим, что преобразователь при этом возбужден на некоторой частоте $\Omega = \Omega_0$. Тогда амплитуда возбуждения его на частоте Ω_0 будет иметь также максимальное значение [5]. Согласно выражению (8), фазовый сдвиг сигнала СВЧ с частотой $\omega_1 = \omega_p$, проходящего через резонатор, будет равен нулю, а сумма фазовых сдвигов в остальных элементах кольца генерации (преобразователя) должна быть равна $2\pi n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), т.е. должна удовлетворять условию баланса фаз. Если перестроить генератор СВЧ на $\pm \Delta\omega_r$, то частоты $\Omega = \Omega_0$ и $\omega_1 = \omega_p$ изменятся таким образом, чтобы выполнялось условие баланса фаз

$$\Delta\varphi_{o.c.} + \Delta\varphi_{yc} = 0, \quad (10)$$

т.е.

$$\operatorname{arctg}\left[-Q_0 \frac{2\Delta\omega_1}{\omega_p}\right] + \Delta\Omega\tau_3 = 0,$$

при этом

$$\Delta\omega_1 + \Delta\Omega = \Delta\omega_r.$$

Таким образом, при перестройке генератора СВЧ обобщенная расстройка будет по модулю увеличиваться и знак ее будет совпадать со знаком $\Delta\omega_r$, если $\omega_1 = \omega_p - \Omega$.

С увеличением $|\alpha|$ преобразователь будет возбужден, при этом генерация будет наблюдаться до тех пор, пока не нарушится условие баланса амплитуд.

Из условия баланса амплитуд (6) определим максимальную расстройку, при которой система еще будет возбуждена

$$|\dot{K}_{yc}| |\dot{K}_{o.c.}| = K_{yc} \alpha \beta \gamma \lambda \frac{1}{(1+\alpha^2)^{1/2}} = 1$$

для $|a_{max}|$ получаем

$$|a_{max}| = [K_{yc}^2 (a_{max}) \lambda^2 \alpha^2 \beta^2 \gamma^2 - 1]^{1/2}. \quad (11)$$

Из выражений (10), (11), учитывая, что перестройка генератора СВЧ возможна как в сторону увеличения, так и уменьшения его частоты от значения, при котором амплитуда возбуждения преобразователя максимальна, т.е. $\alpha = 0$, получим

$$\Delta\Omega_{max} = 2 \frac{\operatorname{arctg}|a_{max}|}{\tau_3}, \quad (12)$$

$$\Delta\omega_{rmax} = \Delta\Omega_{max} + 2 \frac{|a_{max}| \omega_p}{Q_0}, \quad (13)$$

где $\Delta\Omega_{max}$ — ширина зоны возбуждения преобразователя;

$\Delta\omega_{rmax}$ — максимальный частотный интервал перестройки генератора, при котором возбуждение не срывается.

Если полоса пропускания усилителя больше $\Delta\Omega_{max}$, тогда при дальнейшей перестройке генератора и росте фазового сдвига в цепи усиления по закону $\Omega\tau_3$, преобразователь вновь возбудится на другой частоте (рис.2).

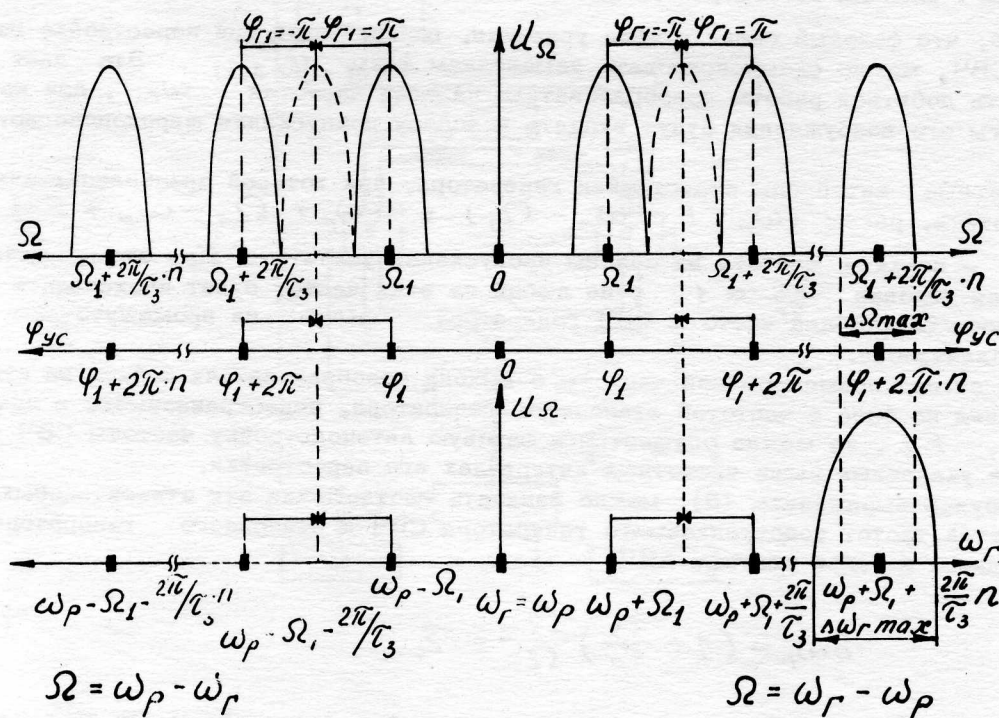


Рис. 2.

Определим частотный интервал между максимумами амплитуд соседних возбуждений

$$\Delta\Omega\tau_3 + \arctg \alpha = 2\pi.$$

Приняв $\alpha = 0$, получим

$$\overline{\Delta\Omega} = \frac{2\pi}{\tau_3}. \quad (14)$$

Для частот возбуждения преобразователя с максимальными амплитудами ($\alpha = 0$) при перестройке генератора в сторону увеличения или уменьшения его частоты от значения, равного ω_p , можно записать:

$$\Omega_n = \Omega_1 + \frac{2\pi n}{\tau_3}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (15)$$

где Ω_1 — первое возбуждение с максимальной амплитудой, при этом $\Omega_1 \gg \Delta\omega_p$ ($\Delta\omega_p$ — полоса пропускания резонатора, что необходимо для нормальной работы преобразователя).

При частотах генератора $\omega_r > \omega_p$ через резонатор будет проходить нижняя боковая ($\omega_r - \Omega$), а при $\omega_r < \omega_p$ — верхняя ($\omega_r + \Omega$).

$$\varphi_{yc.} + \varphi_{o.cb.} \pm \varphi_{r3(2)} = 2\pi n, \quad (16)$$

где $\varphi_{r3(2)}$ — фазовый сдвиг, создаваемый изменением электрической длины линии передачи СВЧ сигнала от генератора до смесителя или до модулятора.

Видно, что фазовый сдвиг в цепи усиления, возникающий при перестройке генератора СВЧ, можно скомпенсировать изменением фазы $\varphi_{r3(2)}$. Это дает возможность добиться работы преобразователя на всех частотах ω_r , при которых частоты его возбуждения будут входить в полосу пропускания широкополосного усилителя.

Частотные интервалы перестройки генератора, при которой преобразователь будет работать, равны $(\omega_p - F - \omega_p - \Omega_1)$ и $(\omega_p + \Omega_1 - \omega_p + F)$, где F — верхняя частота из полосы пропускания усилителя. При этом, если выполняется условие $\frac{\tau_3}{\tau_p} \ll 1$, на любой из этих частот будет происходить процесс переноса флуктуаций частоты СВЧ генератора $\Delta\omega_r$ на промежуточную частоту радиодиапазона.

Если сигнал промежуточной частоты с выхода преобразователя подать на систему сравнения по фазе с частотой эталонного генератора, перестраиваемого в диапазоне $(\Omega_1 - F)$, то можно осуществить фазовую автоподстройку частоты СВЧ генератора в указанных выше частотных интервалах его перестройки.

Пользуясь выражением (5), можно записать соотношения для относительных нестабильностей частот подстраиваемого генератора СВЧ и эталонного генератора, выполняющиеся в такой системе АПЧ

$$\delta\omega_r = \left(1 + \frac{\tau_3}{\tau_p}\right) \frac{\Omega_o}{\Omega_r} \delta\Omega_o, \quad (17)$$

где $\delta\omega_r$ — относительная нестабильность ω_r ;
 $\delta\Omega_o$ — относительная нестабильность Ω_o .

На практике отношение $\frac{\Omega_o}{\omega_r} \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$, а множитель $\left(1 + \frac{\tau_3}{\tau_p}\right)$ при $\tau_p \gg \tau_3$ порядка единицы.

Из выражения (17) видно, что относительные флуктуации частоты эталонного генератора переносятся на относительные флуктуации частоты подстраиваемого СВЧ генератора с коэффициентом $\left(1 + \frac{\tau_3}{\tau_p}\right) \frac{\Omega_o}{\omega_r} \ll 1$.

В качестве эталонного генератора может быть использован перестраиваемый радиочастотный генератор или синтезатор частоты, который обеспечивает сетку кварцеванных частот с необходимым интервалом между ними.

Проведенный анализ показывает, что на основе системы стабилизации, предложенной в работе [3], возможна автоподстройка частоты СВЧ генераторов в диапазоне частот, определяемом удвоенной полосой пропускания широкополосного усилителя.

При перестройке частоты СВЧ генератора в сторону уменьшения или увеличения от значения, равного ω_p , преобразователь будет иметь ряд зон возбуждения на радиочастотах, лежащих в полосе пропускания усилителя.

Ширина каждой зоны возбуждения ограничена условием баланса амплитуд. Частотный интервал между максимумами амплитуд возбуждения будет равен изменению частоты Ω , при котором происходит фазовый сдвиг сигнала промежуточной частоты в усилителе на 2π . Изменением электрической длины линии передачи от генератора до модулятора или до смесителя можно смещать зоны возбуждения по частоте и, таким образом, возбуждать преобразователь на любой частоте СВЧ генератора в указанных интервалах его перестройки.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

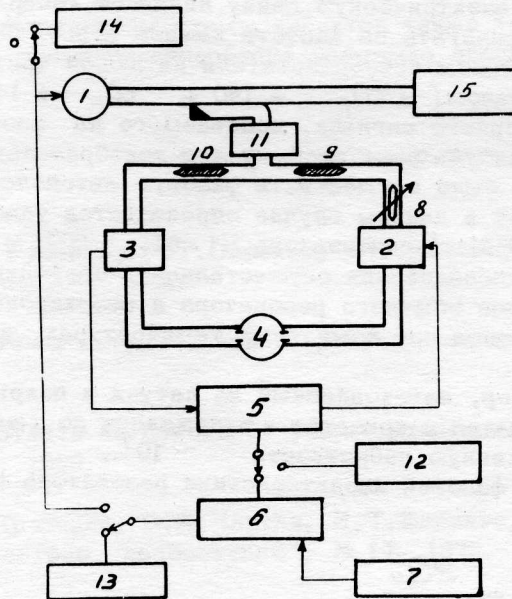


Рис. 3.

Цифрами на схеме обозначены: 1 - клистронный генератор; 2 - амплитудный модулятор; 3 - смеситель; 4 - объемный резонатор; 5 - широкополосный усилитель; 6 - фазовый детектор; 7 - опорный генератор; 8 - фазовращатель; 9, 10 - ферритовые вентили; 11 - резонансный волномер Ч2-32; 12 - осциллограф для наблюдения зон возбуждения преобразователя; 13 - осциллограф для наблюдения фазовых характеристик систем АПЧ; 14 - генератор пилообразного напряжения; 15 - установка для полуавтоматического измерения частот с повышенной точностью Ч3-13.

Эксперимент проводился в трехсантиметровом диапазоне. Генератором СВЧ служил отражательный клистрон трехсантиметрового диапазона с выходной мощностью порядка 60 мвт. В качестве широкополосного усилителя использовался распределенный усилитель УЗ-5 с полосой пропускаемых частот 5 кГц - 150 МГц, коэффициентом усиления 56 дБ и временем задержки не более $7 \cdot 10^{-8}$ сек. Частотный интервал между максимумами возбуждений преобразователя в этом случае, согласно (14), должен быть равен:

$$\overline{\Delta\Omega} = \frac{2\pi}{\tau_3} \approx 89,7 \cdot 10^6 \text{ рад/сек}$$

или

$$\frac{\overline{\Delta\Omega}}{2\pi} \approx 14 \text{ МГц.}$$

В качестве опорного перестраиваемого генератора 7 использовался синтезатор частоты Ч1-51, частота выходного сигнала которого лежит в полосе $0 + 50$ МГц, а относительная нестабильность частоты порядка 10^{-8} за 1 час.

Фазовый детектор 6 был собран на пентоде 6Ж2П, на первую сетку которого подавался сигнал с выхода усилителя 5, а на третью - с опорного генератора 7.

Настройка преобразователя проводилась при разорванной цепи обратной связи системы АПЧ клистрона, в режиме ручной регулировки частоты (РРЧ). Частота

При механической перестройке клистрона в диапазоне $(\omega_p - 140 + \omega_p + 140)$ Мгц на экране осциллографа 12 наблюдался ряд зон возбуждений. Частоты возбуждений измерялись резонансным волномером 11 типа Ч2-32 по отсосу, наблюдаемому на экране осциллографа 12. При этом частотный интервал между максимумами амплитуд возбуждений имел значения 12 - 14 Мгц, что соответствует значению $\Delta\Omega$, вычисленному выше. Изменяя электрическую длину линии от генератора до модулятора фазовращателем 8, можно сдвигать по частоте каждое возбуждение на $\Delta\Omega \approx 13$ Мгц и, таким образом, добиваться работы преобразователя на любой частоте клистрона из диапазона его перестройки, равном $(\omega_p - 140 + \omega_p + 140)$ Мгц.

Устанавливая частоту опорного сигнала, подаваемого на фазовый детектор, равной одной из частот в какой-нибудь зоне возбуждения преобразователя, и включая систему в режим АПЧ, можно было осуществить фазовую автоподстройку частоты клистрона в диапазоне, который в данном случае определяется удвоенным диапазоном рабочих частот ($f = 0 + 50$ Мгц) синтезатора Ч1-51.

При экспериментальном исследовании осуществлялась проверка работоспособности схемы в случае включения в нее обычного резонатора и сверхпроводящего резонатора. Резонатор, который использовался при комнатных температурах, имел нагруженную добротность $\sim 10^4$.

Сверхпроводящий резонатор, изготовленный из латуни и покрытый свинцом электролитическим методом, помещался в криостат и охлаждался до температур жидкого гелия. Резонатор имел нагруженную добротность $\sim 10^7$.

Можно оценить крутизну фазовой характеристики резонатора в окрестности нулевой расстройки по формуле

$$\tau_p = \frac{2Q_n}{\omega_p},$$

где τ_p - крутизна фазовой характеристики резонатора;
 Q_n - нагруженная добротность;
 ω_p - резонансная частота резонатора.

Тогда для обычного резонатора $\tau_p \approx 3,2 \cdot 10^{-7}$, а для сверхпроводящего $\tau_p \approx 3,2 \cdot 10^{-4}$.

Соответственно отношение $\frac{\tau_z}{\tau_p}$ равно 0,22 для обычного и $2,2 \cdot 10^{-4}$ для сверхпроводящего резонатора.

При малых частотах Ω происходило возбуждение преобразователя, вызванное тем, что через резонатор в этом случае проходил также сигнал с частотой генератора ω_r . В связи с этим из диапазона перестройки клистрона, в котором была возможна его автоподстройка, исключался интервал частот, лежащих вблизи частоты ω_p . Для обычного резонатора это был интервал $(\omega_p - 10 + \omega_p + 10)$ Мгц.

В случае применения сверхпроводящего резонатора этот интервал составлял величину порядка сотен килогерц.

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

Частота измерялась установкой для полуавтоматического измерения частоты ЧЗ-13 и записывалась цифропечатающей машиной.

Были получены следующие результаты.

Коэффициент стабилизации системы АПЧ, в случае использования обычного резонатора, составил величину 1500, а относительная неустойчивость за 1 час частоты подстраиваемого генератора в диапазоне перестройки $\sim 10^{-7}$. При использовании сверхпроводящего резонатора коэффициент стабилизации был $\sim 10^6$, а относительная неустойчивость частоты за 1 час $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ во всем диапазоне перестройки.

Таким образом, рассмотренная система стабилизации обеспечивает получение

высокостабильных СВЧ колебаний в диапазоне частот, определяемом полосой пропускания широкополосного усилителя и диапазоном частот используемого опорного генератора.

Применение в данной схеме сверхпроводящего объемного резонатора позволяет значительно уменьшить относительные нестабильности СВЧ колебаний и довести их до величин $\sim 10^{-10}$.

Существенным достоинством схемы является также то, что в качестве широкополосного усилителя и опорного генератора возможно использование приборов, выпускаемых серийно.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. С.И.Бычков, Н.И.Буренин, Р.Т.Сафаров, Стабилизация частоты генераторов СВЧ, "Советское радио", 1962.
2. В.И.Каганов. Системы автоматического регулирования в радиопередатчиках, "Связь", 1969.
3. Ф.Ф.Менде, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат.наук, ФТИНТ АН УССР, 1968.
4. Ф.Ф.Менде, Н.Н.Пренцлау, В.А.Чаркин, И.Т.Баранов, Авторское свидетельство № 340056, "Бюллетень изобретений", № 17, 1972.
5. И.С.Гоноровский, Радиотехнические цепи и сигналы, "Советское радио", 1964.

HIGH STABILITY RETUNABLE ULTRA-HIGH FREQUENCY GENERATOR WITH SUPERCONDUCTING CAVITY

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

The high stability retunable ultra-high frequency generator with a superconducting cavity is described which permits to obtain relative frequency instabilities of 10^{-10} . The above instability is obtained in any point of the readjustment range equal to 100 Mcps, the elements of a microwave circuit and the superconducting cavity being no retunable. The principal relations are given which characterize the generator operation.

Получена редколлегией 13 ноября 1972 года.