

И. И. МИНАКОВА, Г. П. МИНИНА, В. И. НАЗАРОВ,
В. И. ПАНОВ, В. Д. ПОПЕЛЬНИК

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА ПРИ БОЛЬШИХ ДОБРОТНОСТЯХ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА

Теоретически и экспериментально исследуется зависимость характеристик генератора, стабилизированного по трехконтурной схеме сверхпроводящим резонатором, от расстроек частот промежуточного и стабилизирующего резонаторов. Изучается возможность увеличения области удержания и максимального коэффициента стабилизации по сравнению с ранее описанными режимами. Из результатов теоретических и экспериментальных исследований вытекает, что при большой величине отношения добротностей стабилизирующего и промежуточного резонаторов (10^6) введение расстройки между контурами приводит к увеличению полосы удержания, изолированные участки амплитудно-частотных характеристик превращаются в обычные.

Теоретическое рассмотрение процессов в стабилизированных по трехконтурной схеме генераторах [1, 2] и исследовании таких систем при использовании высокодобротных сверхпроводящих резонаторов (СПР) в качестве стабилизирующего элемента [3] позволили выяснить закономерности поведения и дать рекомендации по выбору оптимальных параметров. Были оценены перспективы создания высокостабильных генераторов с узкой естественной шириной линии [4]. Высокая добротность СПР до $Q=10^{11}$ и ее отличие на много порядков от величин добротностей промежуточного Q_2 и генераторного Q_1 резонаторов определяет ряд особенностей поведения таких систем. В настоящей работе теоретически и экспериментально изучена зависимость параметров стабилизации системы с СПР от расстроек частот промежуточного ν_2 и стабилизирующего ν_3 резонаторов. Исследовалась возможность увеличения области удержания и максимального коэффициента стабилизации S по сравнению с ранее описанными режимами [3]. При этом $S = \frac{d\omega}{d\nu_1}$, где ω — частота автоколебаний трехконтурной системы, ν_1 — парциальная частота генератора. В случае больших Q_3 в точке синхронизма при равенстве парциальных частот и частоты автоколебаний $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \omega$ легко могут быть получены изолированные устойчивые состояния. Наличие расстройки $\Delta_2 = \nu_3 - \nu_2$, имеющей величину, сравнимую с шириной полосы пропускания промежуточного контура, меняет резонансные свойства и энергетические соотношения в системе. Как отмечалось [1], изолированные устойчивые состояния с большими S могут существовать при $\nu_2 \neq \nu_3$ и при таких параметрах, при которых в

точке синхронизма нет устойчивых состояний. В настоящей работе исследование изолированных состояний с точки зрения улучшения параметров стабилизации было проведено для случая $\Delta_2 \neq 0$. Уравнение частотной кривой для генератора, стабилизированного высокочастотным резонатором по трехконтурной схеме, при $\Delta_2 \neq 0$ имеет вид

$$\xi_1 = \eta - k_1^2 \frac{M_1}{M_1^2 + M_2^2}, \quad (1)$$

где

$$M_1 = \eta - \xi_2 - k_2^2 \frac{\eta}{\eta^2 + 1/Q_3^2}, \quad (2)$$

$$M_2 = 1/Q_2 + 1/Q_3 \frac{k_2^2}{\eta^2 + 1/Q_3^2}. \quad (3)$$

В (1) — (3) введены обозначения: обобщенные расстройки

$$\xi_i = \frac{v_i^2 - v_3^2}{|\omega^2|}; \quad \eta = \frac{\omega^2 - v_3^2}{\omega^2};$$

k_i^2 — коэффициенты связи между i и следующим за ним контуром.

При кубической аппроксимации характеристики нелинейного активного элемента амплитуда напряжения на эквивалентной емкости контура генератора:

$$A^2 = A_0^2 - \frac{4k_1^2 M_2}{\delta_n (M_1^2 + M_2^2)}, \quad (4)$$

где δ_n — нелинейный коэффициент затухания, определяемый активным элементом.

При $\xi_2 \neq 0$ коэффициент стабилизации S не максимален при $\xi_1 = 0$. Значение S , определенного в точке $\xi_1 = \xi_1'$ и $\eta = 0$, выражается через параметры как

$$S = 1 + \frac{k_1^2 \left(k_2^2 - \frac{1}{Q_3^2} \right) \left[\left(k_2^2 + \frac{1}{Q_2 Q_3} \right)^2 - \frac{\xi_2^2}{Q_3^2} \right]}{\left[\left(k_2^2 + \frac{1}{Q_2 Q_3} \right)^2 + \frac{\xi_2^2}{Q_3^2} \right]^2}. \quad (5)$$

При этом

$$\xi_1' = \frac{k_1^2 \xi_2}{\xi_2^2 + \left(\frac{1}{Q_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{Q_3}{Q_2} \right) k_2^2 + k_2^4 Q_3^2}. \quad (6)$$

Устойчивость стационарных состояний, описываемых (1) и (4), определяется пятью условиями [1], которые достаточно сложно выражаются через параметры. На рис. 1 приведены в качестве примера рассчитанные для реальных параметров системы частотные и амплитудные кривые с учетом всех пяти условий устойчивости. При синхронизме ($\eta = \xi_1 = \xi_2 = 0$) и вблизи от него система имеет неустойчивое стабильное состояние (рис. 1, *a* и *в*). На рис. 1 можно проследить типичное изменение энергетических соотношений при появлении расстройки. Рассчитанные при оптимальных параметрах S_{\max} в точке синхронизма в

4 раза меньше $S_k = k_1^2/k_2^2$ — коэффициента стабилизации консервативной системы. Это различие определяется ограничениями на увеличение $k_1^2 \ll k_{1\max}^2$, накладываемыми энергетическими условиями устойчивости. При увеличении расстройки и фиксированных параметрах системы, как следует из [3], коэффициент стабилизации S может только уменьшаться

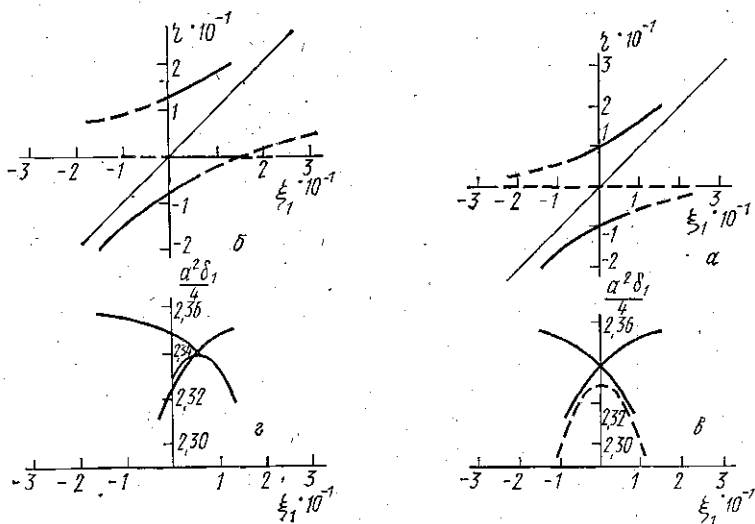


Рис. 1

ся. Однако возникающая при $\xi_2 \neq 0$ несимметрия частотных (рис. 1, б) и амплитудных (рис. 1, г) кривых может привести к наличию устойчивых состояний системы при $k_1^2 > k_{1\max}^2$. Еще существеннее зависимость условий устойчивости от ξ_2 скажется на процессах в системе в случае, когда при $\xi_2 = 0$ существует изолированное устойчивое состояние системы. В этом случае при $\xi_2 \neq 0$ изолированные участки амплитудно-частотных характеристик превращаются в обычные, область удержания увеличивается при практически неизменном значении S .

Характер полученных амплитудных и частотных зависимостей от ξ_2 дал основание для более подробного расчета зависимости $S = f(\xi_2)$ при фиксированных добротностях контуров и различных связях k_1^2 . На рис. 2 приведены ряд расчетных кривых $S = f(\xi_2)$ с учетом условий устойчивости. На полученных графиках отчетливо видно, что при $\xi_2 \neq 0$ возможно устойчивое состояние системы при $k_1^2 > k_{1\max}^2$, где $k_{1\max}^2$ соответствует границе устойчивости при $\xi_2 = 0$.

Экспериментальное исследование характеристик 3-контурной системы стабилизации с СПР производилось для генератора с туннельным диодом на конструкции, показанной на рис. 3. Установка позволяла варьировать значительное число параметров системы во время работы в криостате при температуре жидкого гелия. Конструкция состояла из трех резонаторов. Первый резонатор 1 вместе с включенным в него туннельным диодом 2 являлся одноконтурным генератором. Частоту $f = \nu_1/2\pi$ этого генератора можно было изменять от 800 до 1120 мГц с помощью плунжера 3, а также изменением напряжения питания U

туннельного диода. Резонатор 1 индуктивно связан (связь k_1) с промежуточным резонатором 4 петлей связи 5. Уменьшение добротности Q_2 промежуточного резонатора до величин $20 \div 100$ достигалось выбором формы резонатора, при которой волновое сопротивление ρ_2 было возможно меньшим. В качестве стабилизирующего резонатора 7 применялся СПР, изготовленный из монокристаллического куска ниобия. Связь между резонатором 4 и СПР емкостного типа осуществлялась с помощью заградительного волновода 8 и могла быть изменена в процессе работы погружением сапфирового стержня 9 в СПР. Величина собственной добротности Q_3 СПР при выведенной связи K_2 в различных экспериментах лежала в пределах от $2 \cdot 10^6$ до $5 \cdot 10^5$. Q_3 измерялась методом декрементов [5] при помощи дополнительных петель связи. Кроме того, с помощью этих связей

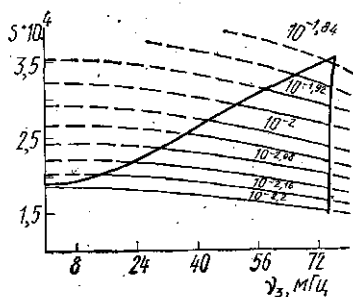
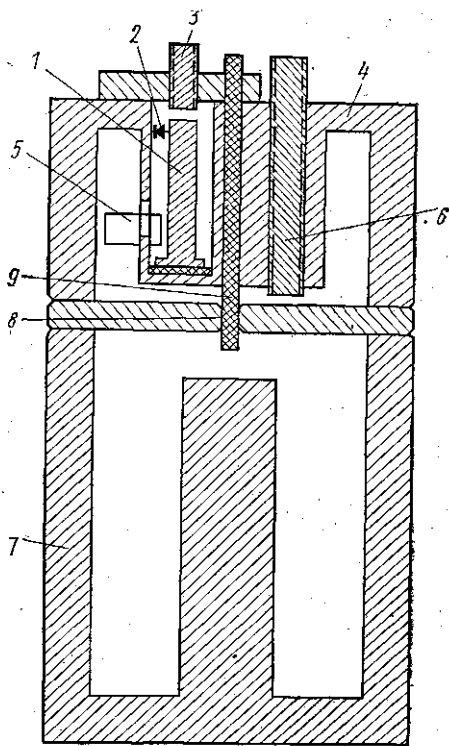


Рис. 2

Рис. 3

регистрировался уровень сигнала в СПР в процессе работы системы на стабильной ветви частотной кривой. Система помещалась в криостат при температуре $4,2 \text{ K}^\circ$. Подставка плунжеров и связи k_2 производилась снаружи криостата с помощью специальных тяг. Мощность сигнала из генераторного резонатора и СПР выводилась через петли связи коаксиальными кабелями.

Измерения производились в следующей последовательности. Первоначально измерялись параметры одноконтурного генератора: снимались зависимость изменения частоты $\nu_1/2\pi$ от напряжения питания U и независимо от перемещения плунжера 3. Одноконтурный режим в системе осуществлялся замыканием плунжера 6 промежуточного резонатора. По полученным данным строился график калибровки одноконтурного генератора. Затем измерялось значение собственной добротности Q_3 и частоты ν_1 стабилизирующего резонатора. После предварительных измерений производилось исследование системы. Стержень связи k_2 полностью выводился из СПР. При этом при разомкнутом плунжере 6 в системе реализовался двухконтурный режим. Перестройка парциальных частот системы на величину $\sim 250 \text{ МГц}$ осуществлялась плунжерами 6

и 3. Из графиков двухконтурной системы определялись величины k_1^2 и Q_2 , введение связи $k_2 > 1/Q_3$ приводило к появлению в системе 3-й частотной ветви.

Максимальное значение связи k_1 , которая могла быть реализована в данной конструкции, составляла $k_1 = 10^{-1}$. Величина k_1 оставалась фиксированной в процессе всех измерений. При такой связи k_1 и $\xi_2 = 0$ устойчивой средней ветви нельзя было получить ни при каких значениях k_2 . При несколько меньшей величине k_1 на изолированной средней

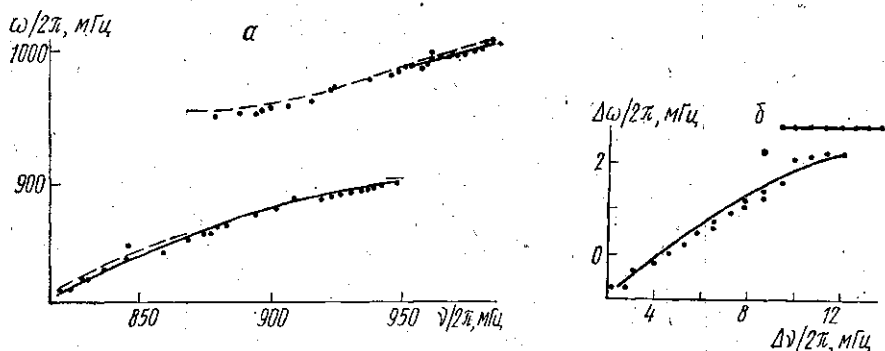


Рис. 4

ветви режим генерации колебаний системы может осуществляться только воздействием внешней силы [3]. Средняя ветвь раскрывается уменьшением связи k_1 . Однако, как это следует из теоретического рассмотрения, с целью получения максимального значения S раскрывать среднюю ветвь выгоднее введением расстройки ξ_2 в систему (рис. 2). В этом случае одновременно увеличивается и область удержания.

Следует отметить, что и с экспериментальной точки зрения возбуждать колебания внешней силой при наличии изолированной средней ветви значительно сложнее, чем работать с раскрытой ветвью при фиксированной расстройке ξ_2 .

Результаты экспериментального исследования частотных кривых трехконтурной системы представлены на рис. 4. Введение расстройки ξ_2 от 0 до 0,01 приводит к появлению раскрытой части средней ветви с областью удержания 5–50 мГц в зависимости от условий эксперимента. Некоторый разброс точек на графике 4, а объясняется неточностью механической перестройки в кристате плунжером первого контура. На рис. 4, б в меньшем масштабе представлен график изменения частоты системы на средней ветви при перестройке частоты $\nu_1/2\pi$ первого контура. С целью получения большей точности измерений на этом участке перестройка частоты $\nu_1/2\pi$ осуществлялась изменением напряжения питания туннельного диода. График показывает переход системы с нестабильной боковой на стабильную среднюю ветвь частотной кривой. По мере перестройки ν_1 частота ω -системы изменялась по нижней ветви частотной кривой, затем скачком переходила на среднюю ветвь, частота которой близка к ν_3 . При изменении ν_1 в пределах полосы удержания частота $\omega \approx \nu_3$ практически не меняется в приведенном масштабе вплоть до точек срыва на верхнюю или нижнюю нестабильную ветвь.

Детальное исследование стабильной средней ветви частотной кривой показало, что при добротности $Q_3 \approx 10^6$ на различных участках ветви частота колебаний и величина S имеют различные значения. На

рис. 5 приведена средняя ветвь частотной кривой, для которой суммарное значение коэффициента стабилизации $S_{\Sigma} = \frac{\Delta\omega}{\Delta\nu_1} = 6 \cdot 10^3$ при полосе удержания 12 мГц. Как видно из графика, в пределах ветви имеются участки с различными наклонами. Оценочно можно разделить кривую на несколько участков и найти область наибольшего коэффициента стабилизации. Для приведенного графика (рис. 5) на выбранных участках $S_I = 2 \cdot 10^3$, $S_{II} = 4 \cdot 10^3$, $S_{III} = 1 \cdot 10^4$. Значение S_{III} максимально для данного графика. Следует отметить, что максимальное полученное значение S на описанной установке составляло $2 \cdot 10^4$.

В процессе исследования было произведено экспериментальное сравнение максимально достижимых коэффициентов стабилизации для двух- и трехконтурной системы при одних и тех же параметрах стабилизируемого генератора и стабилизирующего резонатора. Результаты измерения показали, что при трехконтурной схеме система дает коэффициент стабилизации S , по крайней мере на порядок больше, чем при двухконтурной, а потери энергии на стабилизацию в первом случае значительно меньше.

Из результатов теоретических и экспериментальных исследований вытекает, что при соотношении добротностей $Q_3/Q_2 \approx 10^5 - 10^6$ большие коэффициенты стабилизации при $\xi_2 = 0$ могут быть получены при изолированных состояниях. Введение небольшой расстройки $\xi_2 \neq 0$ улучшает параметры стабилизации: увеличивается область удержания, изолированные участки амплитудно-частотных характеристик превращаются в обычные. Возможно также получение устойчивых состояний при $\xi_2 \neq 0$ и $k_1^2 > k_{1max}^2$. В этом случае при $\xi_2 \neq 0$ может быть получено $S > S_{max}$, где $S_{max} = Q_3/Q_2$ при $\xi_2 = 0$.

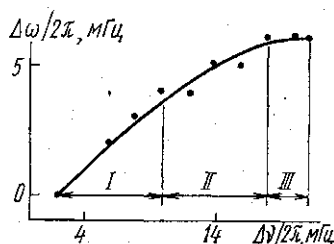


Рис. 5

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Изв. вузов. Радиоэлектроника», 1968, II, № 2.
2. Махаринский О. В., Минакова И. И. «Изв. вузов. Радиофизика», 1973, 16.
3. Минакова И. И., Минина Г. П., Панов В. И., Петников В. Г. «Изв. вузов. Радиоэлектроника», 1967, 19, № 10.
4. Брагинский В. Б., Минакова И. И., Панов В. И. «Радиотехника и электроника», 1976, 21, № 1.
5. Диденко А. Н. Сверхпроводящие волноводы и резонаторы. М., 1973.

Поступила в редакцию
29.7 1976 г.

Кафедра
физики колебаний

0,5.

~~Иванов~~