

И. И. МИНАКОВА, Г. П. МИНИНА

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕХРЕЗОНАТОРНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ

Предлагается метод поверхностей постоянных параметров, позволяющий определять параметры трехрезонаторной системы стабилизации частоты, необходимые для получения максимального коэффициента стабилизации, и определять область возможных изменений параметров при заданном коэффициенте стабилизации. На поверхности заданного коэффициента стабилизации рассмотрены области однозначности, трехзначности и пятизначности частотной кривой, а также область неустойчивости по энергетическому критерию. Приводится расчет полос удержания и раскрытия и исследуется их зависимость от добротности стабилизирующего контура и связей между контурами.

Создание сверхпроводящих резонаторов с большими добротностями ($Q=10^{11}$ при $f_{рез}=10$ ГГц) привело к возможности разработки различных типов систем стабилизации частоты твердотельных генераторов, по стабильности способных конкурировать с квантовыми стандартами частоты [1, 2]. Одной из наиболее перспективных систем стабилизации частоты с точки зрения создания стабильного генератора с очень узкой спектральной линией является трехрезонаторная система со сверхпроводящим резонатором.

За последние годы были теоретически исследованы основные свойства такой трехрезонаторной системы генераторов СВЧ диапазона. Получены зависимости коэффициента стабилизации, областей стабильного режима, потерь на стабилизацию от параметров системы, в том числе и для системы с запаздыванием [3, 4]. Одновременно были развиты некоторые методы оптимизации параметров системы стабилизации частоты по заданным входным данным [5]. Общность полученных закономерностей и методов позволила достаточно глубоко выявить физические процессы в таких системах и создать стабилизированные генераторы в диапазоне СВЧ, а также провести экспериментальную проверку ряда положений теории в радиодиапазоне. Трехрезонаторная система стабилизации частоты со сверхпроводящими резонаторами имеет ряд специфических особенностей, связанных с большими добротностями резонаторов и широким диапазоном изменения параметров.

При работе в одночастотном режиме трехрезонаторная система стабилизации частоты может быть представлена эквивалентной трехконтурной системой с сосредоточенными параметрами. При последовательном соединении контуров реактивными связями k_1 и k_2 , режим стабилизации существенно зависит от связей и добротностей контуров: Q_1 —

контура генератора, Q_2 — промежуточного и Q_3 — сверхпроводящего резонатора, инкремента генератора и расстроек между контурами. С точки зрения стабилизации частоты наиболее существенным и информативным является исследование уравнения частот автоколебаний. Введем относительные расстройки частоты автоколебаний $\eta = \frac{\omega - \nu_3}{\omega}$,

парциальных частот генератора $\xi_1 = \frac{\nu_1 - \nu_3}{\omega}$ и промежуточного контура

$\xi_2 = \frac{\nu_2 - \nu_3}{\omega}$ относительно парциальной частоты сверхпроводящего резонатора. Тогда уравнение частот автоколебаний при перестройке парциальной частоты генератора и $\xi_2 = 0$ можно записать как

$$\xi_1 = \eta \left[1 + k_1^2 \frac{k_2^2 - 1/Q_3^2 - \eta^2}{(k_2^2 + 1/Q_2 Q_3 - \eta^2)^2 + \eta^2 (1/Q_3 + 1/Q_2)^2} \right]. \quad (1)$$

При $k_2^2 > k_{2кр}^2 = 1/Q_3^2$ частотная кривая (1) имеет среднюю ветвь, проходящую через точку синхронизма $\xi_1 = \xi_2 = \eta = 0$. Коэффициент стабилизации системы S в этой точке равен

$$S = \left. \frac{d\xi_1}{d\eta} \right|_{\substack{\xi_1=0 \\ \eta=0}} = 1 + k_1^2 \frac{k_2^2 - 1/Q_3^2}{(k_2^2 + 1/Q_2 Q_3)^2}. \quad (2)$$

Предельно достижимая величина S ограничивается одним из пяти критериев устойчивости. Для точки синхронизма при малодобротном промежуточном контуре наиболее существенным являются «энергетический» и «сложный» критерии.

«Сложный» критерий определяет границу гашения автоколебаний при увеличении связи k_1^2 за счет эквивалентного положительного затухания, вносимого системой стабилизации частоты в контур генератора. Практически для всех современных полупроводниковых генераторов реально достижимые величины связи $k_1^2 \leq 0,1$ и «сложный» критерий не ограничивают предельно достижимого коэффициента стабилизации S .

При нарушении устойчивости по «энергетическому» критерию

$$k_1^2 \leq (1 + Q_3/Q_2) (k_2^2 + 1/Q_2 Q_3) \quad (3)$$

колебания на средней ветви энергетически не выгодны, и в системе возможна генерация только на одной из малостабильных боковых частот.

Учитывая (3), для $S_{пред}$ получаем:

$$S_{пред} = 1 + \left(1 + \frac{Q_3}{Q_2} \right) \frac{k_2^2 - 1/Q_3^2}{k_2^2 + 1/Q_2 Q_3}. \quad (4)$$

Как следует из (4), для увеличения $S_{пред}$ целесообразно уменьшать величину Q_2 . Снижение Q_2 за счет уменьшения характеристического сопротивления контура ρ_2 улучшает все характеристики стабилизации. В диапазоне СВЧ для резонатора специальной формы были получены добротности $Q_2 \approx 10 \div 50$ при малых потерях. Снижение добротности Q_2 за счет увеличения потерь менее целесообразно с точки зрения оптимальных условий стабилизации, так как это эквивалентно уменьшению связи k_1^2 . Однако технически последнее существенно проще.

Выяснение предельных возможностей рассматриваемой системы стабилизации частоты при использовании сверхпроводящих резонато-

ров может быть проведено при исследовании зависимости частотной кривой и характеристик стабилизации от параметров. Для генераторов СВЧ, работающих при комнатных температурах при фиксированных добротностях контуров Q_2 и Q_3 и широких возможностях регулировки связей, был разработан метод оптимизации параметров, основанный на выделении плоскости коэффициентов связи [4].

Для расчетов системы стабилизации частоты с СПР этого недостаточно. При переходе к сверхпроводящему состоянию и при изменении температуры системы Q_3 изменяется на несколько порядков. Связи, особенно k_2^2 между промежуточным и сверхпроводящим резонатором, должны быть достаточно точно определены и настроены при комнатной температуре. В связи с усложнением задачи для оптимизации параметров рассматриваемой системы был разработан метод выделения поверхностей фиксированных параметров. Поверхность параметров и ее сечения, по которым производится оптимизация режимов, обусловлена конкретной конструкцией генератора и требованиями к его выходным данным. Так, при определении диапазонов параметров, при которых может быть получен заданный коэффициент стабилизации S , целесообразно использовать поверхность параметров k_1^2, k_2^2, Q_3 при $S = \text{const}$ и $Q_2 = \text{const}$. Если же требуется определить максимальные достижимые коэффициенты стабилизации в широком диапазоне изменения Q_3 , то следует использовать поверхность S, k_2^2, Q_3 . Из (2) следует, что при $S \gg 1$ и $Q_2 = \text{const}$ вместо построения обоих типов поверхностей можно рассчитывать и строить одну поверхность $S/k_1^2, k_2^2, Q_3$ и по точкам на поверхности или ее образующим находить параметры исследуемых режимов.

Расчет и построение поверхности параметров и ее сечений (рис. 1 и 2) был сделан для реальной системы стабилизации частоты генератора на туннельном диоде при

$$\begin{aligned} \nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Гц}, \quad L_1 = 2 \cdot 10^2 \text{ нГн}, \quad |R_3| = 37 \text{ Ом}, \\ Q_1 = 10, \quad Q_2 = 10^3 \div 10^{11}. \end{aligned}$$

Рассмотрим поверхность S, k_2^2, Q_3 . На рис. 1 она построена при $k_1^2 = 10^{-1}$. Из рис. 1 видно, что S изменяется при изменении k_2^2 немонотонно. Сначала при увеличении k_2^2 S увеличивается и при

$$k_{2\text{гр}}^2 = \frac{2}{Q_3^2} + \frac{1}{Q_2 Q_3} \tag{5}$$

достигает своего максимального значения

$$S_{\text{max}} = \frac{k_1^2 Q_2 Q_3}{4} \tag{6}$$

Дальнейшее увеличение связи между промежуточным контуром и сверхпроводящим резонатором приводит к снижению нагруженной добротности стабилизирующего контура, и величина коэффициента стабилизации уменьшается. При увеличении добротности сверхпроводящего резонатора, если остальные параметры фиксированы, S сначала возрастает, а затем при $Q_3 \gg 1/k_2^2 Q_2$, когда нагруженная добротность уже не увеличивается, выходит на постоянный уровень $S_k = k_1^2/k_2^2$, соответствующий при $k_1^2/k_2^2 \gg 1$ коэффициенту стабилизации консервативной системы.

На рис. 1 представлена поверхность $S_{\text{пред}}(k_1^2, k_2^2, Q_3)$, определяемая энергетическим критерием (3). Величина S_{max} может возрастать за счет увеличения k_1^2 . Из (3) при $k_2^2 = k_{2\text{гр}}^2$ получаем максимальное допустимое значение $k_1^2 = \frac{2}{Q_2^2}$ и, следовательно, достижимое значение $S_{\text{max}} = 1/2 \frac{Q_3}{Q_2}$.

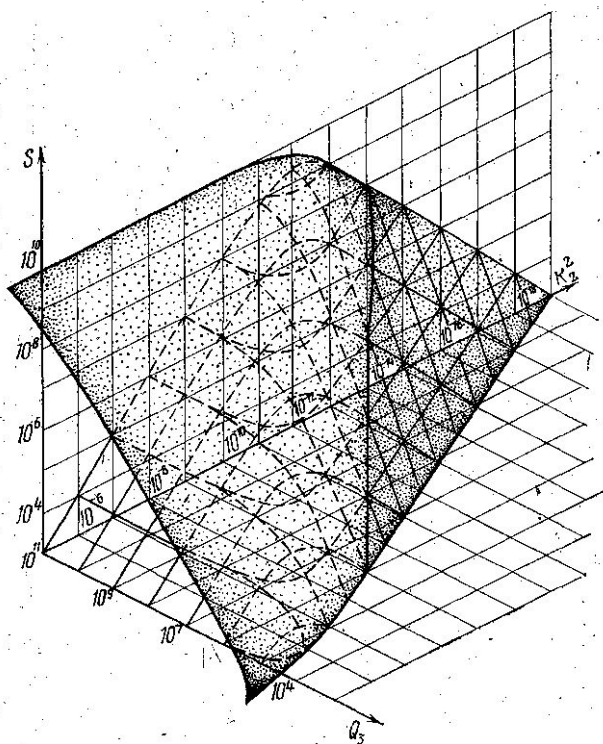


Рис. 1

Если построенная поверхность рассматривается как поверхность заданного коэффициента стабилизаций $S = \text{const}$ (на рис. 2, $S = 10^6$), то на нее можно нанести линии границ областей однозначности частотной кривой (4), трехзначности (3), пятизначности (2) и области нарушения устойчивости по (3) на средней ветви (1).

Граница областей 1 и 2 определяется простым соотношением

$$k_1^2 = 1/Q_2(Q_3 k_2^2 + 1/Q_2).$$

В области 2 средняя ветвь частотной кривой устойчива, но точка синхронизма перекрыта боковыми ветвями. В таком режиме генератор возбуждается в точке синхронизма под воздействием внешнего сигнала.

Граница областей 2 и 3 определяется соотношением

$$k_1^2 = 1/Q_2(2k_2^2 + 1/Q_2 - 1/Q_3).$$

При $Q_3 \gg Q_2$ и $k_2 \ll 1/Q_2$ это выражение стремится к $k_1^2 = 1/Q_2^2$. Граница областей 3—4 выражается сложным образом. С точки зрения создания системы стабилизации частоты режимы, соответствующие одно-

значной частотной кривой, представляют малый интерес. При $S=10^5$ на построенной поверхности область (4) отсутствует. Как видно по графикам сечений (рис. 2, а и б), при заданной величине она недостижима.

Подробнее выяснить зависимость режимов работы системы с заданным коэффициентом стабилизации S от коэффициентов связи k_1^2 , k_2^2 и добротности можно с помощью сечения поверхности $S=\text{const}$ плоскостями постоянных параметров (рис. 2, а, б и в).

При фиксированном k_1^2 (рис. 2, в) для k_2^2 и Q_3 , связанных соотношением $k_2^2 \simeq 1/Q_2 Q_3$, заданный коэффициент стабилизации близок к S_{max} .

Увеличение связи k_1^2 (рис. 2, а и б), с одной стороны, расширяет при фиксированном S диапазон возможных изменений остальных параметров, а с другой — ведет к увеличению степени затягивания, и система последовательно проходит области 4, 3, 2 и 1, т. е. приближается граница неустойчивости по энергетическому критерию. Переход из области 1 в область устойчивых режимов 2 при фиксированном S можно осуществить увеличением $Q_3 k_2^2$.

Из анализа параметров по графикам рис. 2 следует, что $S=10^5$ достижим при $Q_3 > 10^6$, причем при $Q_3 > 2,5 \cdot 10^6$ точка синхронизма может быть открыта (область 3).

Предложенный способ дает возможность найти параметры системы, обеспечивающие заданный или максимальный S в точке синхронизма. Важной характеристикой системы является величина полосы удержания Φ , определяемой по точкам срыва со средней ветви частотной кривой при изменении частоты генератора.

В отсутствие гашений автоколебаний в точке синхронизма зависимость величины Φ от параметров может быть оценена по фазовому условию устойчивости (критерий «вертикальных касательных»). Из уравнения (1) при $d\xi_1/d\eta = 0$ получаем уравнение для точки срыва со средней ветви η_Φ и с боковых ветвей η_F

$$Q_3^8 \eta^8 + Q_3^6 \eta^6 (k_1^2 Q_3 - 4a + 2c^2) + Q_3^4 \eta^4 [c^4 + 2a(3a - 2c^2) + k_1^2 Q_3^2 (2a - c^2 - 3b)] + Q_3^2 \eta^2 [k_1^2 Q_3^2 (2ab - bc^2 - 3a^2) - 2a^2 (2a - c^2)] + a^2 (a^2 + k_1^2 Q_3 b) = 0, \quad (7)$$

где
$$a = k_2^2 Q_3^2 + \frac{Q_3}{Q_2}, \quad b = k_2^2 Q_3^2 - 1, \quad c = 1 + \frac{Q_3}{Q_2}.$$

Решение этого уравнения можно провести поэтапно, определив при фиксированных k_2^2 и Q_2 зависимости $\eta_{\Phi, F}$ от k_1^2 при параметре Q_3 , затем, пользуясь уравнением частот (1), построить график зависимости $\Phi = 2\xi_{1\Phi}$ и $F = 2\xi_{1F}$ от k_1^2 также при параметре Q_3 . По графикам рис. 2 выбираем $k_2^2 = 10^{-8}$, обеспечивающую при $S=10^5$ выход в область 3. Графики рис. 4 построены только для положительных $\eta_{\Phi, F}$, так как картина симметрична относительно оси k_1^2 . Подобные графики дают возможность определить зависимость Φ и F от параметров системы.

Не останавливаясь подробно на характере всех зависимостей, вытекающих из анализа графиков (рис. 3), отметим только наиболее существенные характеристики полосы удержания. Полоса удержания Φ монотонно увеличивается по мере увеличения k_1^2 . Из графика рис. 4

следует, что полосы удержания растут с увеличением k_2^2 и Q_3 , так как при этом увеличивается расстройка между собственными частотами системы связанных контуров промежуточный—сверхпроводящий резонатор. Однако если $k_2^2 \gg 1/Q_3 Q_2$, то Φ стремится к постоянной величине так же, как и S . Таким образом, при параметрах, соответствующих S_{\max} , получается и близкая к предельной полоса удержания.

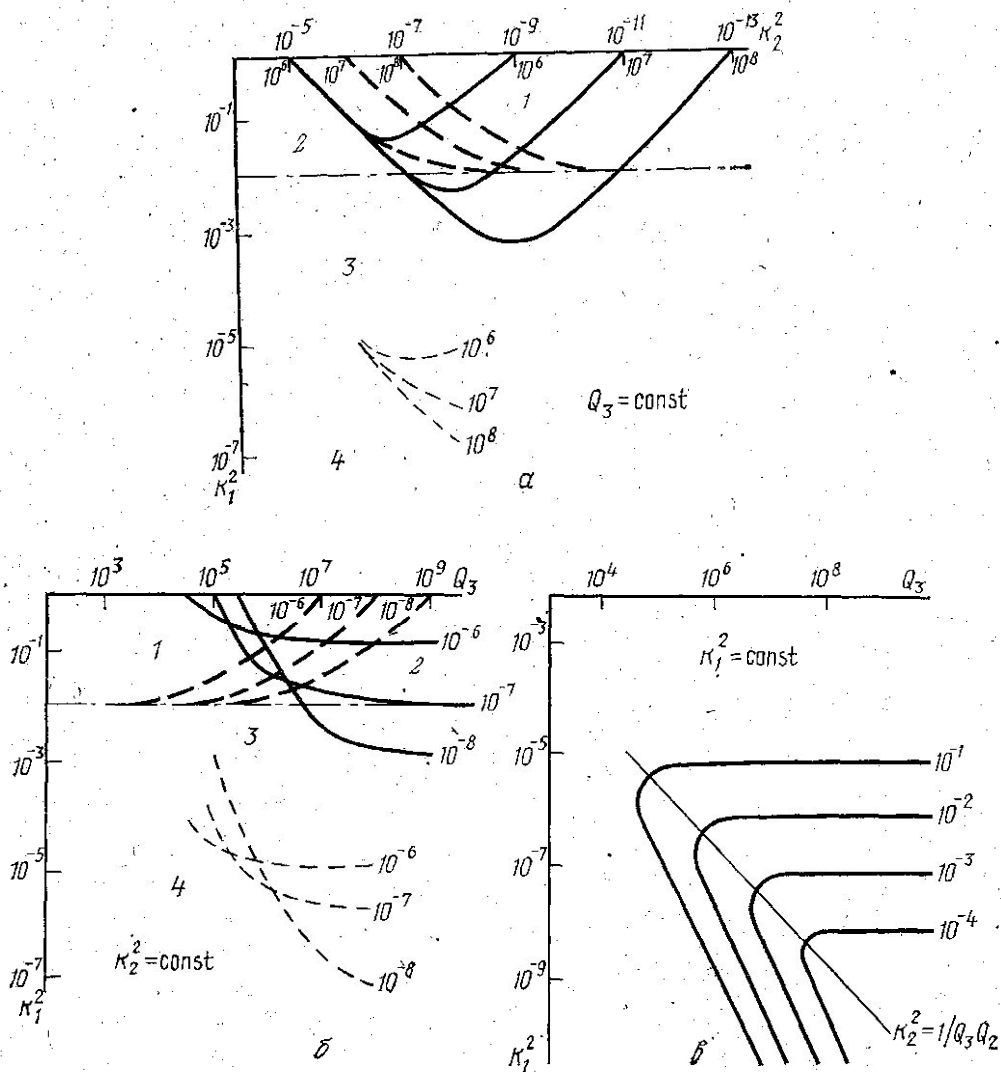


Рис. 2 а, б, в

В рассчитываемой системе при гелиевых температурах могли появляться трудноустраняемые расстройки между частотами промежуточного контура и сверхпроводящего резонатора. Расчеты, проведенные для расстройки $\xi_2 = 0,008$ и различных Q_3 , показали, что если ν_3 находится в полосе пропускания промежуточного контура (например, при $Q_2 = 10$), то расстройка практически не сказывается на величинах S и Φ в исследованных режимах.

Машинный расчет устойчивости различных режимов по всем пяти критериям показал, что при малодобротном промежуточном контуре ($Q_2 \sim 10$) величина полосы удержания Φ достаточно точно определяется

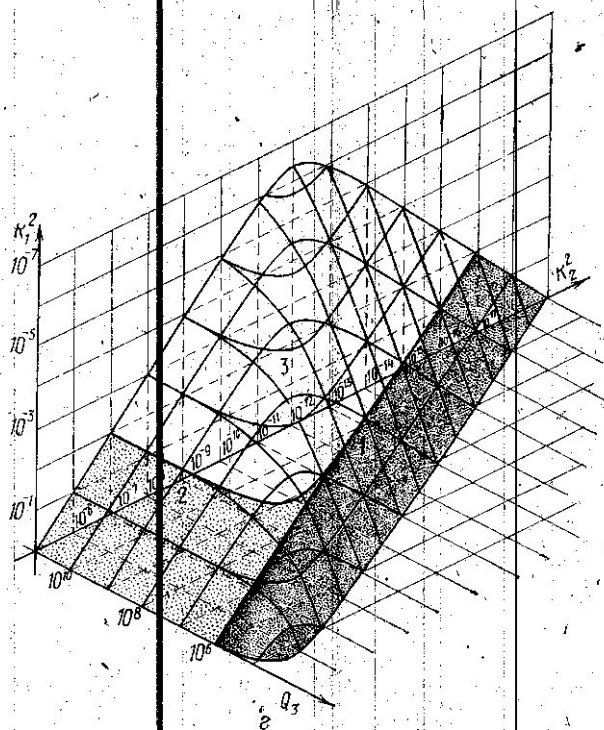


Рис. 2 а

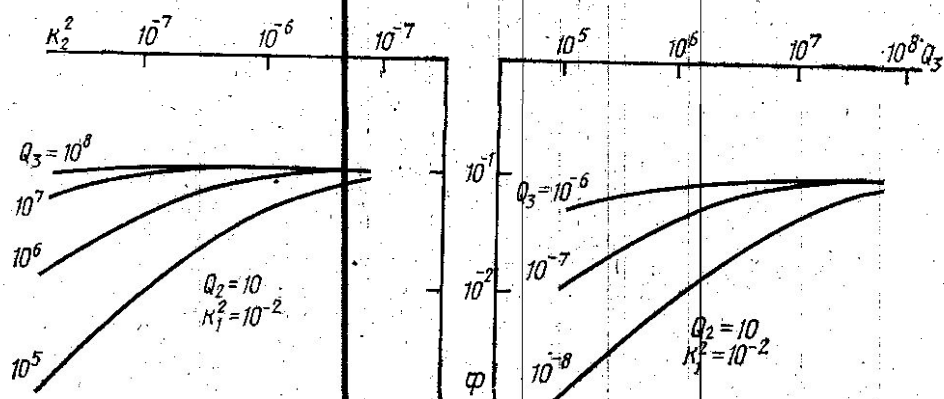


Рис. 3

критерием «вертикальных касательных». При больших добротностях Q_2 величина Φ , определенная по критерию «вертикальных касательных», является завышенной, и необходимо более подробное исследование.

Предложенный способ исследования системы стабилизации частоты, основанный на построении поверхностей параметров, позволяет рас-
 чы б б арам ы ля
 получения максимального коэффици-
 ента стабилизации системы S определять диапазон возможных изменений параметров при заданном S .

Для реального генератора на туннельном диоде в диапазоне изменений параметров были проведены экспериментальные измерения частотных кривых и величины S . Эксперимент дал хорошее совпадение с машинным расчетом.

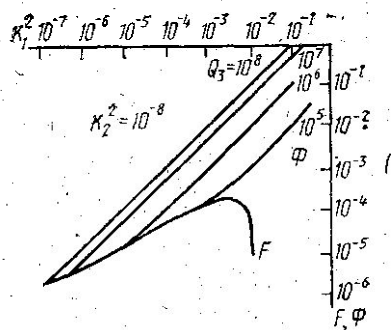


Рис. 4

ЛИТЕРАТУРА

1. Jimenez J. J., Benard J. «Oscillateur a etat solide couples a une cavite supraconductrice», L'ode Electrique, No. 2, 4 b, 1973.
2. Stein S. P., Turneomre G. P. «Electron. Lett.», 8, 321, 1972.
3. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 4, 58, 1966.
4. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Изв. вузов», радиоэлектроника, 11, № 1, 41, 1968.
5. Махаринский О. В., Минакова И. И. «Изв. вузов», радиоэлектроника, 13, № 7, 805, 1970.

Поступила в редакцию
 7.10 1975 г.

Кафедра
 физики колебаний