

Поступила в редколлегию 22.07.86

УДК 621.373

Н. Н. ПРЕНЦЛАУ, канд. техн. наук, *А. П. БЕСКОРСКИЙ*,
М. Н. ОФИЦЕРОВ, *Н. А. КУЧЕРЯВЕНКО*,
И. Ф. ХАРЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук

АВТОГЕНЕРАТОР СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА СПИРАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ

Стабильность частоты источников электромагнитных колебаний в основном определяется добротностью колебательной системы, влиянием изменения температуры окружающей среды на элементы схемы, а также нестабильностью напряжения источников питания. Для каждого частотного диапазона характерна определенная конструкция колебательной системы, а следовательно, максимальное значение ее добротности. На частотах от десятков до сотен мегагерц обычно используются колебательные контуры с сосредоточенными параметрами — устройства с малыми габаритными размерами и низким значением добротности ($10 \dots 10^2$). В этом частотном диапазоне объемные резонаторы не используются из-за их громоздкости. На частотах выше одного гигагерца употребляются объемные резонаторы — устройства с малыми габаритными размерами и высоким значением добротности ($10^3 \dots 10^4$). Колебательные контуры в этом диапазоне не применяются, так как их невозможно реализовать в обычных конструктивных формах. На частотах от сотен мегагерц до гигагерца обычно используют контуры переходного типа, т. е. системы, обладающие свойствами устройств с сосредоточенными параметрами — колебательные контуры и с распределенными — объемные резонаторы. Это связано с тем, что на этих частотах объемные резонаторы еще имеют значительные размеры, а индуктивности контуров вырождаются в один виток. Добротность и габаритные размеры устройств переходного типа имеют промежуточное значение между объемными резонаторами и колебательными контурами, а конструктивно сложны.

Используемые в качестве фильтров в частотном диапазоне от 30 до $2 \cdot 10^3$ МГц спиральные резонаторы имеют габаритные размеры, соизмеримые с размерами колебательных контуров, и обеспечивают добротность, незначительно отличающуюся от добротности коаксиальных резонаторов [1]. В литературе практически отсутствуют сведения о спиральных резонаторах как частотно-задающих элементах автоколебательной системы.

Рассмотрена возможность построения автогенератора электромагнитных колебаний стабильной частоты метрового диапазона на базе спирального резонатора. Был выполнен транзисторный авто-

Генератор по трехточечной емкостной схеме со спиральным резонатором, включенным в цепь база—коллектор (рис. 1, а). За основу взята схема задающего генератора, используемого в приборе Г4-144 (ЕЯЗ.262.002ЭЗ) [2].

Известно [1], что максимальная добротность цилиндрического спирального резонатора достигается при соотношении $D/d=1,8$,

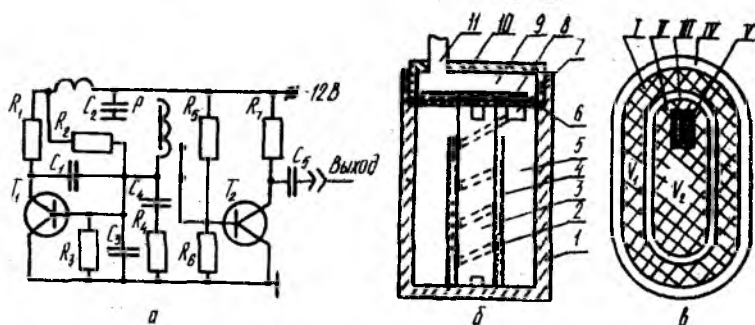


Рис. 1

где D, d — диаметры его экрана и спирали соответственно. Добротность медного резонатора с погрешностью 20 % можно определить из выражения $Q=20DV\sqrt{f}$, где D выражено в сантиметрах, f — в мегагерцах [1].

Исследовалась серия спиральных резонаторов на разные частоты, спирали которых размещались в экране одного диаметра ($D=50$ мм, $D/d=1,75$, длина резонатора $l=70$ мм). Упрощенная конструкция такого резонатора представлена на рис. 1, б.

Спиральные резонаторы подобного типа имеют малые габаритные размеры до частот 100 МГц, а при снижении частот — размеры увеличиваются. Нами был испытан спиральный резонатор, внутренний проводник которого выполнен в виде спирали из провода, уже свернутого в спираль [3]. Его добротность почти не отличается от добротности обычного спирального резонатора. Так, при тех же габаритных размерах резонатора частота снижается примерно в восемькратно, а добротность отличается от расчетной ориентировочно на 30 %.

Одним из недостатков спиральных резонаторов является наличие дискретного ряда резонансных частот, которые могут привести к самовозбуждению системы не только на основной, но и на высших модах. Выполнение спирального резонатора с градиентом волнового сопротивления по длине оси спирали резко снижает коэффициент передачи резонатора на высших модах и практически он имеет одну резонансную частоту. Градиент волнового сопротивления достигается выполнением спирали с переменным поперечным сечением по длине оси, например, в виде усеченного конуса [4]. Был изготовлен спиральный резонатор с основной резонансной частотой 100 МГц, цилиндрическим экраном и конической

спиралью, в котором $d_1/D \geq 0,25$, $d_2/D \leq 0,75$, и $2 < d_2/d_1 < 3$, где d_1 , d_2 — диаметры меньшего и большего основания усеченного конуса. Экспериментальные исследования такого резонатора показали, что в нем существует резонанс на основной частоте (100 МГц), амплитуда сигнала первой моды резонансной частоты (195 МГц) снижена в 40 раз, а амплитуда второй моды (290 МГц) снижена в 100 раз по сравнению с основной. До 1500 МГц включительно резонансные частоты отсутствуют. Таким образом, резонатор с конической спиралью имеет, по сути, только основную частоту резонанса, а остальные резонансные частоты либо отсутствуют, либо снижены так, что на них самовозбуждение схемы не выполняется из-за несоблюдения баланса амплитуд.

Добротность резонатора со спиралью, изготовленной в виде усеченного конуса, почти не отличается от добротности резонатора с цилиндрической спиралью. Это связано с тем, что диаметры спирали у большего и меньшего оснований усеченного конуса отличаются от оптимального ($D/d=1,8$) на значение, при котором добротность резонатора снижается незначительно [1].

Параметры	Источник					
	[3]	[3]	[1]	[4]	[1]	[1]
f , МГц	50	100	300	400	700	1000
$Q_{расч}$	700	1000	1700	2000	2650	3100
$Q_{эксп}$	500	700	1300	1550	2150	2500
$Q_{эксп}/Q_{расч}$	0,71	0,70	0,76	0,78	0,81	0,80

В таблице представлены данные экспериментального исследования добротности различных конструкций резонатора. В верхней строке даны ссылки, где описаны конструкции указанных резонаторов (в ссылке [1] — цилиндрический резонатор). Полученные результаты свидетельствуют о небольшом различии (до 30 %) добротностей расчетных и экспериментальных значений, что приемлемо для их расчета.

Снижение влияния колебаний температуры окружающей среды на частоту достигается термостатированием элементов схемы. Для этого в стационарных условиях берут электрические термостаты. В полевых условиях они не всегда пригодны в связи с большим потреблением энергии, поэтому применяется пассивное термостатирование. Термостатируемый объект размещают в глубоких скважинах либо в среде плавящегося вещества, обычно используемого как охлаждающее [5]. В последнем случае термостатирующей средой служит вещество с теплотой плавления в сотни Дж/г и температурой плавления десятки-сотни градусов Цельсия.

Однако подобное термостатирование эффективно лишь тогда, когда тепло, выделяемое термостатирующим объектом, может поддерживать процесс плавления длительное время.

При термостатировании маломощных элементов, не способных плавить вещество, необходим дополнительный подогрев, что приво-

дит, как и в случае использования электротермостата, к значительному расходу энергии. Здесь, на наш взгляд, лучше использовать в качестве термостатирующего вещество с температурой плавления ниже температуры окружающей среды и от нее получать тепло. Далее рассмотрена возможность применения таяния льда для термостабилизации малоомощной аппаратуры. Целесообразность такого термостатирования оправдана тем, что температура плавления льда стабильна, а современные средства теплоизоляции типа экранно-вакуумной позволяют хранить лед в объеме типа сосуда Дьюара длительное время. К тому же, возможно выполнение пассивного термостата с пониженной скоростью таяния льда.

Схема такого термостата представлена на рис. 1, а. Принцип его работы заключается в том, что объем со льдом разделили на две камеры: I — с объемом V_1 , и II — с объемом V_2 термоизолирующей полостью III. От окружающей среды лед термоизолирован полостью IV. В полости II размещен приведенный автогенератор V (рис. 1, б).

Под воздействием температуры окружающей среды лед сначала плавится в камере I, стабильно поддерживая в ней температуру 0°C . Так как градиент температуры между камерами I и II отсутствует, нет и теплопритока к камере II, в связи с чем лед в ней не тает — при отсутствии мощности рассеяния на размещенных в ней радиоэлементах ($Q_p=0$). После таяния льда в камере I вода в ней начинает нагреваться из-за теплопритока из окружающей среды и тогда возникает градиент температур между камерами I и II, в связи с чем тепловая мощность передается в камеру II, и лед в ней начинает таять. Поскольку температура воды в I поднимается медленно, то медленно повышается и тепловая мощность, подводимая к камере II, что приводит к значительному времени таяния льда в ней. При этом вода в камере I представляет вещество, поглощающее подводимое из окружающей среды тепло.

Для расчета термостата примем, что полости III и IV заполнены теплоизолирующим веществом типа экранно-вакуумной изоляции. Это дает возможность использовать уравнение Фурье для тепловой передачи мощности. В принципе, полости III и IV могут быть и вакуумными, тогда необходимо пользоваться уравнением Стефана-Больцмана. Однако экранно-вакуумная изоляция более эффективна, чем вакуумная полость.

Тепловая мощность Q_1 к объему V_1 , согласно формуле Фурье, равна

$$Q_1 = \sum Q_i = T_K \sum \frac{\lambda_i S_i}{l_i} = T_K A, \quad (1)$$

где Q_i — тепловая мощность, передаваемая по i -му элементу через полость IV, λ_i , l_i , S_i — коэффициент теплопроводности i -го элемента, его длина и площадь поперечного сечения, соответствен-

но. T_K — температура окружающей среды. Это допущение справедливо для таящего льда, температура плавления которого 0°C . Таким образом, T_K является градиентом температур. В случае использования вещества с отличной от 0°C температурой плавления необходимо брать разность температур окружающей среды и температуры плавления вещества. Время таяния льда t_1 в объеме V_1 равно $t_1 = \sigma V_1 Q_1^{-1}$ (2), где σ — теплота плавления льда.

Чтобы определить время таяния льда t в объеме V_2 , рассмотрим уравнение теплового баланса ($Q_p = 0$):

$$\sum Q_i(T) = Q_2 + Q_3, \quad (3)$$

где $Q_i(T)$ — мощность, подводимая к объему V_1 после таяния в нем льда по i -му элементу; Q_2 — мощность, передаваемая к объему V_2 ; Q_3 — мощность, расходуемая на нагрев воды в объеме V_1 .

Уравнение (3) запишем в виде

$$A(T_K - T) = Q_3 + T \left(\sum \frac{\lambda_i S_i'}{l_i} \right) = BT + Q_3. \quad (4)$$

Здесь λ_i, S_i', l_i — те же обозначения, что и в (1), но относящиеся к полости III. Из (4) имеем $Q_3 = AT_K - NT$ (5), $N = A + B$.

Скорость нарастания температуры в объеме V_1

$$\frac{dT}{dt} = \frac{AT_K - NT}{C_p V_1} = \frac{AT_K - NT}{L}, \quad (6)$$

C_p — теплоемкость воды.

Решая (6) и принимая граничные условия при $t=0, T=0$, получаем

$$T = \frac{AT_K}{N} [1 - \exp(-NLT)]. \quad (7)$$

Тогда мощность, передаваемая к объему V_2 , будет

$$Q_2 = BT = B \frac{AT_K}{N} [1 - \exp(-NLT)]. \quad (8)$$

Для нахождения времени таяния льда в объеме V_2 составим равенство

$$\int_0^t \frac{ABT_K}{N} [1 - \exp(-NLT)] dt = \sigma V_2. \quad (9)$$

Уравнение (9) приведем к виду

$$\frac{ABT_K}{N} \{t + (NL)^{-1} \exp(-NLT) - (NL)^{-1}\} = \sigma V_2. \quad (10)$$

Из (10) определяется время таяния льда в объеме II (t). Тогда общее время таяния льда в термостате равно $(t_1 + t)$. Отметим,

что после таяния льда в камере II температура воды будет повышаться медленно, что вызовет медленное изменение частоты. При этом скорость изменения температуры в камере II ниже, чем скорость изменения температуры окружающей среды.

Предварительный расчет термостата по приведенным равенствам показал, что использование современных сортов экранно-вакуумной изоляции и массы льда в 15—20 кг обеспечивает продолжительность автономной непрерывной работы термостата примерно один год. При этом он имеет форму сферы диаметром около 400 мм.

Экспериментально исследовался источник стабильной частоты $f \sim 300$ МГц. Его принципиальная схема представлена на рис. 1, а, где приняты следующие обозначения. Транзисторы T_1, T_2 — марки КТ382А; резисторы $R_1 \dots R_7$ — 270 Ом; 1,6 кОм, 2,7 кОм, 10 кОм, 360 Ом, 4,7 кОм, 50 Ом соответственно; C_1 — 2,2 пФ, C_3 — 1,5 пФ, C_4 — конструктивная емкость, C_5 — 3 пФ; P — спиральный резонатор. На транзисторе T_1 собран генератор, на транзисторе T_2 — выходной каскад.

Конструктивно источник стабильной частоты выполнен в одном стакане 1 (рис. 1, б), который является и экраном спирального резонатора P . В стакане 1 расположена спираль 2 резонатора, навитая на тефлоновый каркас 3 и механически закрепленная втулкой 4. Резонансная полость 5 ограничена крышкой 6, которая также является печатной платой схемы (см. рис. 1, а). Монтаж выполнен согласно чертежу Е.ЯЗ.262.002 [2]. Транзистор T_1 (7) расположен в резонансной полости, остальные элементы 8 — в отсеке 9 стакана 1. Стакан закрыт герметичной крышкой 10 с предусмотренным соединением 11, через которое подается питание, а также выводится генерируемый сигнал. Стакан 1 совместно с элементами схемы размещался в верхней части емкости со льдом и находился в среде до полного его таяния.

Исследуемый источник стабильной частоты запитывался от аккумуляторной батареи 12 В. Измерение частоты проводилось с помощью электронно-счетного частотомера ЧЗ-34 с блоком ЯЗЧ-51, а напряжение питания контролировалось цифровым вольтметром В7-18. Кривые изменения частоты и напряжения питания показаны на рис. 2.

В результате экспериментов получена относительная нестабильность частоты 10^{-7} за 1 ч. Однако, как показано на рисунке, наблюдается синхронное изменение частоты при изменении напряжения питания. Зависимость генерируемой частоты от напряжения источника питания, частично ухудшающая стабильность генерируемой частоты, может использоваться для электронной перестрой-

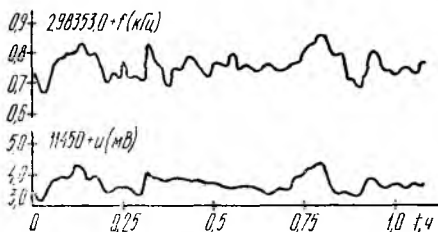


Рис. 2

ки частоты генератора в пределах 0,5 МГц, и автоматической подстройки частоты автогенератора по более стабильному сигналу. При этом крутизна электронной перестройки частоты источника составляет порядка 0,15 МГц/В. Из рис. 2 следует, что в отдельные промежутки времени относительная нестабильность частоты достигает значения примерно 10^{-8} , свидетельствует о возможности повышения стабильности частоты использованием более стабильного источника питания или выбором схемы. Выходная мощность генерируемой частоты приблизительно 2 мВт.

Длительное термостатирование позволяет исключить время выхода источника стабильной частоты на режим, обусловливаемое установлением температуры в электротермостате, плавлением вещества при его прогреве и т. д. Оно снижает разброс значений частоты, наблюдающийся, когда источник включается, например, при термоциклировании криогенных устройств.

Здесь необходимо знать следующее. В приведенных расчетах термостата принято допущение, что соотношение мощности рассеяния на термостатируемом объекте к общим теплопритокам извне намного меньше единицы. В этом случае мощность рассеяния можно не учитывать ($Q_p=0$), что справедливо, когда термостатируются пассивные элементы, например СВЧ-резонаторы.

Однако во время экспериментов термостатировался не один резонатор, а вся схема автогенератора. Рассеиваемая мощность на элементах схемы была порядка 0,1 Вт, т. е. соизмерима с суммарной мощностью теплопритоков из окружающей среды при использовании многослойной экранно-вакуумной изоляции с коэффициентом теплопроводности $\lambda=5 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К). Поэтому в расчетах она не учитывалась. Исследуемый автогенератор термостатировался в заполненном льдом сосуде Дьюара.

Таким образом, показана возможность создания автогенераторов стабильной частоты метрового диапазона на базе спиральных резонаторов, термостатируемых тающим льдом с относительной нестабильностью частоты $10^{-7} \dots 10^{-8}$ за 1 ч, что соизмеримо с относительной нестабильностью частоты автогенераторов на базе термостатируемых кварцевых резонаторов.

Список литературы: 1. Захарьяцев Л. И. Конструирование СВЧ каскадов на резонансных линиях и спиральных фильтрах. М., 1974. 175 с. 2. Г4—144. Генератор сигналов высокочастотный. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЕЯЗ.262.001.ТО. К., 1983. 51 с. 3. А. с. 1246191 СССР. Перестраиваемый спиральный резонатор/Н. Н. Пренцлау, А. П. Бескорсый, В. М. Дмитриев// Открытия. Изобретения. 1986. № 27. С. 203. 4. А. с. 1262609 СССР. Спиральный резонатор/Н. Н. Пренцлау, И. Ф. Харченко, А. П. Бескорсый//Открытия. Изобретения. 1986. № 37. С. 233. 5. Алексеев В. А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. М., 1975. 88 с.

Поступила в редколлегию 05.02.87