

ГЕНЕРАТОРЫ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЗОНАТОРАМИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ

Стабильные по частоте генераторы СВЧ-диапазона необходимы в связных, локационных и измерительных устройствах различного назначения. Традиционное техническое решение – применение кварцевого автогенератора и цепочки умножителей частоты или кольца фазовой автоподстройки частоты. Но это приводит к появлению нескольких дополнительных каскадов формирования опорного сигнала с множеством паразитных спектральных составляющих на выходе. Развитие новой технологии малогабаритных высокодобротных диэлектрических СВЧ-резонаторов привело к созданию твердотельных колебательных систем, использующих эффект внутреннего отражения электромагнитных волн в диэлектрических телах и размещаемых в открытом пространстве или в линиях передачи СВЧ-сигнала. Эта технология серьезно изменила конструкцию высокостабильных генераторов и позволила существенно снизить массогабаритные показатели таких устройств, повысить надежность и стабильность, а, самое главное, расширить возможности их миниатюризации и функциональной нагрузки. Что же сегодня представляют собой стабильные по частоте генераторы с диэлектрическими резонаторами дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн?



Л.Белов, В.Хилькевич

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА

В научно-технической литературе нет точного определения диэлектрического (керамического) резонатора (ДР). Обычно *диэлектрическими* называют высокодобротные резонаторы, выполненные из диэлектрического материала с металлизированной поверхностью в форме диска или параллелепипеда, часто с внутренним коаксиальным отверстием (рис.1). Резонаторы с внутренним отверстием называют также *коаксиальными*. Некоторые производители обозначают их аббревиатурой CR (Coaxial Resonator). Ряд фирм используют аббревиатуру CR для обозначения керамических резонаторов (Ceramic Resonator) с сосредоточенными параметрами L и C, рассчитанных на пониженные частоты 0,2–1 ГГц. В целом существуют следующие типы диэлектрических СВЧ-резонаторов:

- на основе пьезокварцевого кристалла с особым срезом, резонансная частота которых соответствует частоте гармоник;
- на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в виде линии задержки;
- в виде дисков из лейкосапфира с объемными азимутальными волнами высокого порядка, резонаторы на моде "шепчущей галереи" (Whispering Gallery Mode – WGM);
- в виде отрезков микрополосковых линий, заполненных диэлектриком;



Рис.1. Варианты коаксиальных диэлектрических резонаторов

Таблица 1. Основные параметры ДР различных типов

Тип резонатора	Диапазон частот, ГГц	Добротность Q (для частоты 3 ГГц)	Особенность
Керамический LC-фильтр	0,01–3	80–300	Отсутствие паразитных резонансов, компактность
Диск из лейкосапфира	2–10	10^5	Сверхвысокая стабильность, высокая стоимость
Диск из керамики с объемными азимутальными волнами	1–20	$(1-6) \cdot 10^3$	Повышенная добротность
Фильтр или линия задержки на ПАВ	0,1–2	$(3-6) \cdot 10^2$	Компактность
Сфера из ЖИГ	1–10	$(1-3) \cdot 10^3$	Управление частотой в широкой полосе путем изменения магнитного поля
Микрополосковый	1–50	$(1-2) \cdot 10^2$	Конструктивная простота
Оптоэлектронная линия задержки	1–100	$(3-5) \cdot 10^2$	Высокая стабильность, сложность конструкции
Коаксиальный керамический	1,5–50	$(0,3-5) \cdot 10^3$	Компактность, высокая стабильность, низкая стоимость

- сферические ферромагнитные резонаторы из железо-иттриевого граната, размещаемые в управляющем магнитном поле;
- резонаторы в виде оптоэлектронных линий задержки.

В табл. 1 приведены значения параметров резонаторов различных типов.

Сегодня особый интерес вызывают ДР, обеспечивающие в СВЧ-автогенераторах повышенную стабильность средней частоты источников автоколебаний f_{cp} и весьма низкий уровень спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов автоколебаний $S_{\varphi}(F)$ при частоте отстройки от несущей F . При выборе ДР необходимо выполнить противоречивые требования получения заданного номинала резонансной частоты f_0 при заданных значениях выходной мощности автогенератора P_H и уровня $S_{\varphi}(F)$ в определенном интервале частоты отстройки от несущей F . Основные параметры ДР – резонансная частота f_0 и эквивалентная добротность Q в окрестности этой частоты. Кроме того, при выборе резонатора следует учитывать следующие параметры:

- геометрические размеры резонатора (наибольший наружный размер ДР в зависимости от f_0 изменяется в пределах 3–18 мм);
- относительную диэлектрическую проницаемость ε используемого материала;
- температурный коэффициент изменения частоты, ТКЧ;
- электрическую длину ДР в долях длины волны ($\lambda/4$ или $\lambda/2$);
- волновое сопротивление Z_0 в месте подключения.

Некоторые поставщики ДР указывают также метод нанесения покрытия на выводы (лужение или серебрение), тепловое сопротивление материала, его удельную плотность, массу, гигроскопичность, чувствительность к изменению атмосферного давления и механическим воздействиям, а также чистоту обработки поверхности резонатора.

Значения основной (наиболее низкой) резонансной частоты ДР составляют 1–16 ГГц (в отдельных случаях – 35 ГГц). Как и в резонаторах других типов, входное сопротивление ДР с повышением частоты проявляет резонансные свойства, принимая на определенных частотах максимальные и минимальные значения.

На рис. 2 показана расчетная зависимость входного сопротивления от частоты $|Z_{вх}|(f)$ для ДР из материала с $\varepsilon = 20$ размером $3 \times 3 \times 8,4$ мм и с цилиндрическим отверстием диаметром 1,14 мм. В окрестности основного резонанса на частоте 2 ГГц при электрической длине ДР $\lambda/4$ максимальное значение $Z_{вх}$ составляет 5,2 кОм, добротность – 350, $Z_0 = 13,9$ Ом, эквивалентная индуктивность – 1,4 нГ.

Важна также эквивалентная (с учетом связи с линией) добротность ДР Q , зависящая от электрической длины резонатора и диэлектрической постоянной ε материала. На частоте 3 ГГц значение Q составляет от 250 до $6 \cdot 10^4$. Наиболее высокие значения добротности достижимы при умеренных значениях ε (добротность дискового резонатора, выполненного на материале с $\varepsilon = 30$, на частоте 2 ГГц может составлять 50000). Поскольку потери в диэлектрике возрастают пропорционально частоте, качество резонатора, как правило, оценивается значением произведения добротности на частоту, на которой этот параметр измеряется – $Q \cdot f_0$. Значения $Q \cdot f_0$ лежат в интервале $(4-100) \cdot 10^4$ ГГц, причем для конкретного материала это произведение постоянно. Значение добротности

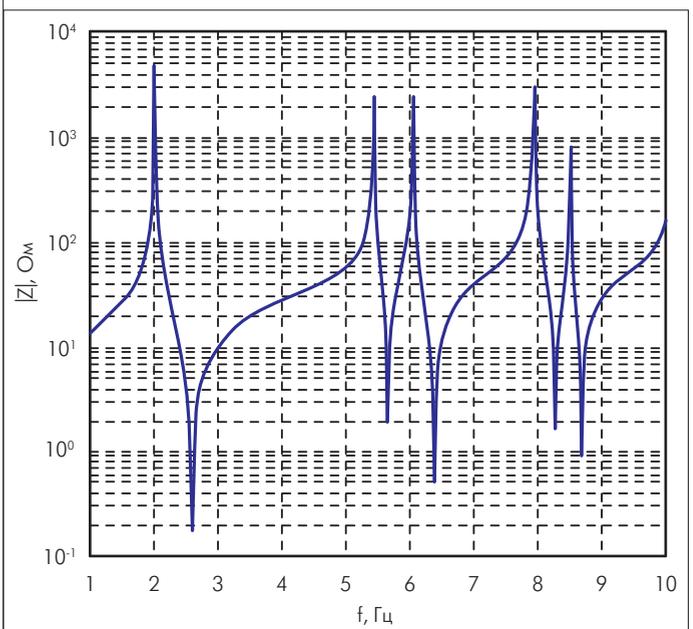


Рис. 2. Частотная характеристика входного сопротивления для ДР с основной частотой 2 ГГц

Q существенно изменяется в диапазоне температур -50...100°C.

Сейчас наиболее широко применяются диэлектрические материалы с проницаемостью ϵ от $9 \pm 0,5$ до 98 ± 1 . ТКЧ резонаторов может принимать положительные или отрицательные значения $(-4...8) \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, что открывает широкие возможности для термокомпенсации частоты автоколебаний.

Типовая модель диэлектрического СВЧ-резонатора – отрезок однородной (без скачка волнового сопротивления) линии передачи с потерями, короткозамкнутый на одном конце и нагруженный на емкость связи с автоколебательной схемой на другом конце. Длина такого резонатора l рассчитывается исходя из значения ϵ используемой керамики и электрической длины: при электрической длине $\lambda/4$ она составляет $l = 75/f_0 \sqrt{\epsilon}$, где l выражается в миллиметрах, а f_0 – в гигагерцах.

ДР, помимо возможности достижения значительно более высоких частот основного резонанса, имеют ряд преимуществ перед кварцевыми резонаторами. В них практически отсутствует эффект старения, а их резонансная частота гораздо менее чувствительна к увеличению мощности колебаний в резонаторе. Это объясняется отсутствием кристаллической структуры и пьезоэффекта в материале ДР.

Среди производителей ДР, представленных на мировом рынке, можно выделить фирмы Murata Manufacturing (www.murata.com), Integrated Microwave Corp. (www.imcsd.com), Trans-Tech Inc. (www.trans-techinc.com), Dielectric Laboratories (www.dilabs.com), National Magnetics Group (<http://tciceramics.com>). Компания Murata специализируется на выпуске ДР по запатентованной технологии Resomix, фирма TCI – на выпуске магнитных и диэлектрических СВЧ-резонаторов, в том числе термокомпенсированных ДР с добротностью до $5 \cdot 10^4$ на частоте 2 ГГц. IMC производит более 100 модификаций ДР с внутренними полостями. Размер резонатора модели DR03F98Q3000DYS компании составляет $3 \times 3 \times 5$ мм, резонансная частота 3000 МГц; диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 98$; характеристическое сопротивление

$Z_a = 6,3$ Ом; добротность $Q = 390$ при электрической длине $\lambda/2$, эквивалентная индуктивность 0,21 нГн, емкость 13,3 пФ, резонансное сопротивление 1,56 кОм. Компания также предоставляет программу расчета параметров колебательного контура, эквивалентного выбранному резонатору и моде сигнала.

Для управления резонансными частотами в небольших пределах (до 3%) применяются механические регуляторы в виде металлизированных или диэлектрических настроечных винтов, располагаемых вблизи ДР. Электронные управляющие элементы (варикапы) связаны с ДР общей линией передачи. ДР размещается на диэлектрической подложке малой толщины с повышенным значением ϵ .

ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ-КОЛЕБАНИЙ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Генераторы колебаний СВЧ-диапазона с ДР (Dielectric Resonator Oscillator – DRO) [1] различаются способом стабилизации частоты, видом управления частотой, конструктивным исполнением и активным элементом (рис.3). Автономные генераторы (Free Running, FR) формируют стабильные по частоте колебания с неопределенной начальной фазой. Генераторы с синхронизацией частоты (Frequency Locked, FL) включают в себя генератор, управляемый напряжением (ГУН), с ДР и встроенную систему фазовой автоподстройки частоты с внутренним (Internal Reference, IR) или внешним (External Reference, ER) опорным источником и фиксированными значениями коэффициентов деления и частоты сравнения. В генераторах с фиксированной настройкой (Fixed Tunable, FT) частота автоколебаний f определяется резонансной частотой ДР f_0 с учетом импеданса колебательной системы. В генераторах с цифровым управлением (Digital Tunable, DT) предусмотрена возможность программной установки частоты и коррекции ухода частоты генерации в широком интервале температур. Для этого в схему ГУН с ДР включают датчик температуры, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и систему авторегулирования.

В качестве активного элемента генератора могут применяться кремниевые биполярные гетеротранзисторы (HBT), что позволяет увеличить его выходную мощность. А при необходимости получения более высокой частоты генерации выбор падает на арсенидгаллиевые псевдоморфные и полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (PHEMT и HEMT). В генераторах на HEMT с волоконно-оптической линией задержки (ВОЛЗ) для стабилизации частоты используется эквивалент ДР в виде отрезка ВОЛЗ длиной 1–10 км с фотодиодом и фотодетектором на его концах. Активными элементами генератора могут служить диоды Ганна или лавиннопролетные диоды (ЛПД). Для повышения энергетического КПД и снижения уровня паразитных составляющих удвоенной частоты применяются двухтактные автоколебательные схемы (Push-Push) с ДР.

Согласно формуле Лисона (D.V.Leeson), в линейном приближении зависящая от частоты составляющая фазового шума

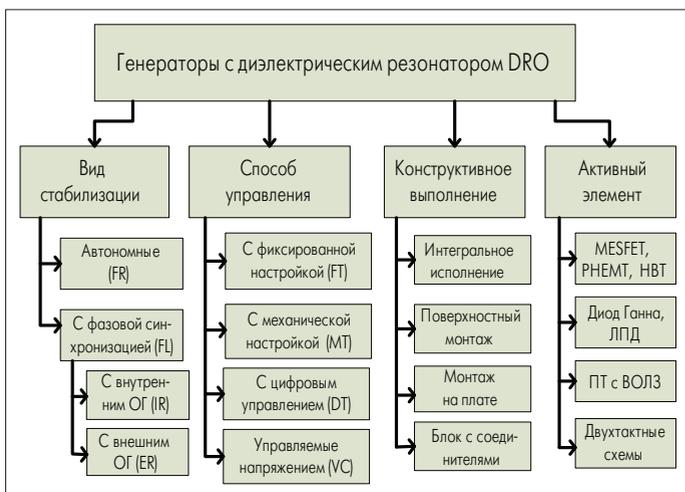


Рис.3. Классификация СВЧ-генераторов с диэлектрическими резонаторами

автоколебаний $S_{\varphi}(F)$ обратно пропорциональна квадрату эквивалентной добротности Q_L колебательной системы:

$$S_{\varphi}(F) = \frac{N_0 kT}{2P_r} \left[1 + \left(\frac{1}{2Q_L} \right)^2 \left(\frac{f_0}{F} \right)^2 \right],$$

где N_0 – фактор шума активного элемента, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, P_r – мощность автоколебаний.

Значение Q_L уменьшается при усилении связи ДР с автогенератором, поэтому снижение шумов возможно лишь для маломощных автогенераторов с достаточно малой исходной нестабильностью частоты.

Связь ДР с автогенератором обеспечивает микрополосковая линия (МПЛ), вблизи одного конца которой располагается ДР. К другому концу МПЛ присоединено согласованное сопротивление Z_0 (рис.4). Активным элементом автогенератора может быть любой, в том числе и полевой, транзистор (ПТ) (рис.4). Расстояние h между ДР и МПЛ определяет степень связи генератора с резонатором, длина d задает параметры преобразования комплексного сопротивления ДР в импеданс Z_g , подключаемый к автоколебательной системе. Металлический или

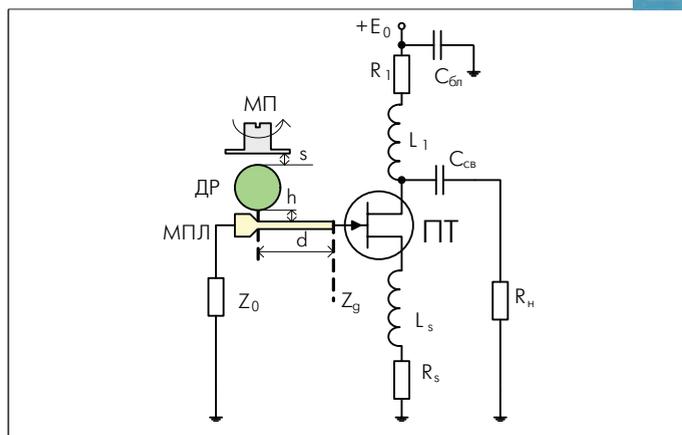


Рис.4. Схема генератора сантиметрового диапазона с ДР

диэлектрический винт МП, располагаемый на расстоянии s от ДР, служит для механической подстройки частоты f_0 . Компоненты L_s и R_s с межэлектродными емкостями активного элемента образуют цепь обратной связи; L_1 , R_1 и блокировочная емкость $C_{бл}$ служат для присоединения источника питания с напряжением E_0 ; нагрузка R_n подключается через емкость связи $C_{св}$. Изменяя волновое сопротивление одного из участков составной МПЛ, можно преобразовывать реактивную часть со-

Таблица 2. Параметры серийных генераторов с диэлектрическими резонаторами

Фирма, сайт	Серия	Частота $f_{ср}$, ГГц	Полоса перестройки BW_n/BW_e , МГц	Выходная мощность, дБмВт	СПМ фазового шума S_{φ} (100 кГц), дБн/Гц, на частоте 6 ГГц	Диапазон рабочих температур, °С	Напряжение питания, В	Ток потребления, мА	Габариты, мм
Luff Research www.luffresearch.com	PLOD	0,4–3	–	13	-120	0...60	12	290	55×55×15
Narda Microwave www.nardamicrowave.com	PLCRO-DS-026	0,5–3	–	12	-125	-30...60	12	320	2,2×2,2×0,6
MITEQ www.miteq.com	DLP	0,5–3,2	–	13	-130	-10...60	12	250	53×70×33
TRAK Microwave www.trak.com	OSC046 ¹⁾	1–4	1%	13	-135	-30...70	-15	250	–
Raditek International www.raditek.com	RDRO-E-1	4,4–5,9	4,6/2,6	13	-123	-40...70	5	55	45×45×25
Z-Communications www.zcomm.com	CROxxxA	1,4–6	±0,25%	0-7	-120...-107 ²⁾	-40...85	5	35	12×12×5
Resotech www.resotechinc.com	DRO-XXX ³⁾	4–14	3%	14	-115	-30...70	12	75	55×58×15
Atlantuc Microwave www.atlanticmicrowave.co.uk	ADR-13	0,3–14	–	13	-115	0...50	15	125	57×29×15
www.AtlanTecRF.com	ACR, ADR	0,3–14	1%/0,2%	13	-115	-40...85	15	125	30×57×19
Atlantic Microwave www.paskall.co.uk	BP1 PLDRO	3,5–15	±25	0-5	120	-45...70	12	95	52×52×16
Narda www.nardamicrowave.com	NHO-XX-XXX	6–18	±10	14	-100	-54...85	15	125	40×20×14
Jersey Microwave www.jerseymicrowave.com	FRDRO-XX-X	1–18	–	16	-100	-30...60	12	180	2,2×1×0,8
JSB Service Company www.jsbservice.com	VCO/DRO-XXX	2,8–18	10	5	–	-30...60	–	–	25×25×11
Communication Techniques www.herley.com	DRO ⁴⁾	3–18	2%	14	-125	-40...75	15	75	57×30×16
Spectrum Microwave www.specwave.com	MDR2100	2,5–21	±20	10	-124	-20...65	12	125	44×52×38
Nexyn www.nexyn.com	NXOS	0,5–23	±25	10	-120	0...60	12	100	55×55×15
Amplus Communication www.amplus.com.sg	AM4200	0,5–24	2%	13	-120	-30...70	12	75	30×57×16
Wisewave Technologies www.wisewave-inc.com	OFD ⁵⁾	8–26	–	13-23	-113	0...50	12	150	–
Microwave Dynamics www.microwave-dynamics.com	DRO-1000 ⁶⁾	2–26	100/25	13	-125	-55...95	15	90	56×25×17
Elcom Technologies www.elcom-tech.com	MPDRO	0,5–26	–	12	-126	-25...75	12	200	57×35×20
MITEQ www.miteq.com	PLDRO ⁷⁾	1,75–40	–	13	-112	-20...70	5	350	56×56×24
Lucix www.lucix.com	LO-XXX-F8B	1–44	1/4%	15	-135	-40...70	5	104	–

Примечание. ¹⁾ четыре когерентных выходных канала; ²⁾ для отстройки 10 кГц; ³⁾ механическая перестройка частоты; ⁴⁾ встроена защита от нестабильностей питания; ⁵⁾ с встроенным умножителем частоты; ⁶⁾ встроены двухкаскадный буферный усилитель, предусмотрена термокомпенсация ДР; ⁷⁾ для частот 1,7–6,7 ГГц используется выходной субгармонический делитель частоты, для частот 13,4–40 ГГц – умножитель частоты на два или на четыре; с встроенным умножителем частоты.

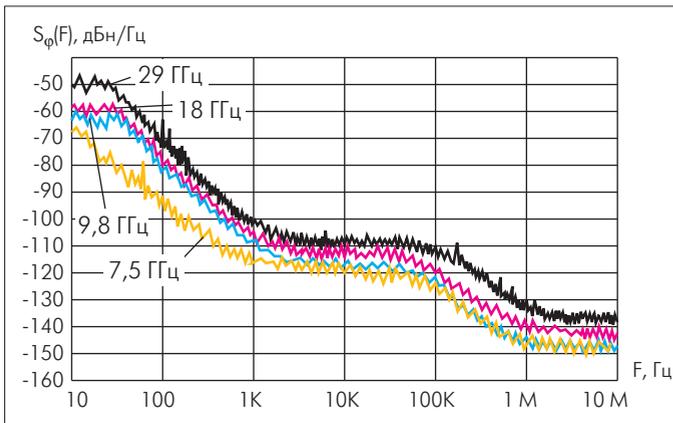


Рис.5. Типичная зависимость уровня фазового шума от отстройки для фазосинхронизированных генераторов серии PLDRO фирмы MITEQ

противления, вносимого диэлектрическим резонатором так, чтобы уровень СПМ фазового шума снижался на 10–15 дБ. При этом значения частоты отстройки от несущей, мощности в нагрузке и электронного КПД останутся теми же, что и при использовании однородной линии.

По сравнению с традиционным генератором на базе LC-контура, применение ДР в генераторах на частоту 1–3 ГГц позволяет на 15–20 дБ снизить уровень приведенного к одинаковой частоте фазового шума. В генераторах с ДР на частоте 4 ГГц достигнуто значение $S_{\phi}(10 \text{ кГц})$ около -143 дБн/Гц, что на 10–15 дБ ниже, чем у кварцевого генератора с высококачественным множителем частоты. Опубликованы результаты измерения уникально низкого уровня фазового шума при использовании охлаждаемого сапфирового ДР типа WGM.

К недостаткам высокочастотных ДР относится увеличение постоянной времени колебательной системы. В результате длительность переходного процесса при электронной перестройке частоты возрастает до десятков микросекунд. Но это, разумеется, несущественно для источников опорных колебаний с фиксированной частотой.

В табл.2 приведены основные характеристики ряда серийных моделей генераторов с ДР. Среди поставщиков СВЧ-генераторов с диэлектрическими резонаторами можно отметить компанию MITEQ, выпускающую несколько серий фазосинхронизированных ДР-генераторов. Для генераторов серии LPLM с коаксиальными резонаторами на частоте 15 ГГц гарантирует-

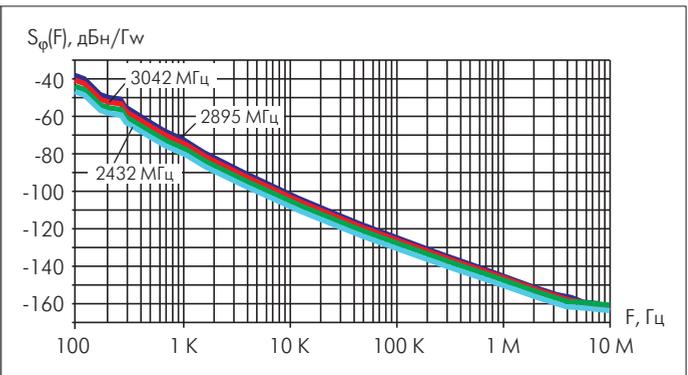


Рис.6. Зависимость СПМ фазового шума от отстройки для ГУН модели DCRO-2503000-10 фирмы Synergy Microwave

ся уровень $S_{\phi}(1 \text{ кГц}) = -95 \text{ дБн/Гц}$, а $S_{\phi}(1 \text{ МГц}) = -120 \text{ дБн/Гц}$; на частоте 4 ГГц значение S_{ϕ} на 13–20 дБ ниже. На рис. 5 показана зависимость уровня фазового шума $S_{\phi}(F)$ от отстройки для фазосинхронизированных ДР-генераторов типа PLDRO.

В генераторах серии DRO-1000 фирмы Microwave Dynamics для снижения чувствительности к изменениям нагрузки и повышения выходной мощности использован двухкаскадный усилитель мощности. Для улучшения температурной стабильности применена термокомпенсация уходов частоты. Уровень $S_{\phi}(1 \text{ МГц})$ генераторов этой серии на частоте 22 ГГц составляет -130 дБн/Гц, на частоте 4 ГГц – -140 дБн/Гц.

Корпорации Universal Microwave (www.vco1.com) и Synergy Microwave (www.synergymwave.com) производят управляемые напряжением по частоте генераторы с различными типами стабилизирующих резонаторов. На рис.6 показана зависимость СПМ фазового шума от отстройки для одного из таких генераторов.

У фирмы Resotech можно найти модели ДР-генераторов с электронной перестройкой в пределах 0,2–2% и механической перестройкой в пределах 3–4%. В продукцию компании Luff Research входят несколько серий фазосинхронизированных генераторов с ДР, различающихся рабочей частотой. Luff выпускает целую гамму генераторов с ДР для частот от 1 до 44 ГГц, в том числе автономные генераторы типа FRDRO. Модели FRDRO (серии F8B, FC) перестраиваются напряжением в пределах 1–4%. Кроме того, компания поставляет фазосинхронизированные генераторы с внутренним и внешним опорными источниками.

Еще один производитель генераторов с ДР – фирма JSB Service Company (рис.7). Микросборки серии SDRO-XXXX этой фирмы допускают механическую перестройку частоты в полосе $\pm 10 \text{ МГц}$ для средней частоты 2 ГГц, а генераторы серии VCO/DRO – электронную перестройку частоты в тех же пределах.

Фирма Jersey Microwave предлагает автономные и фазосинхронизированные ДР-генераторы на фиксированные частоты диапазона 1–18 ГГц. Ее продукция характеризуется высокой степенью защиты от акустических и электрических помех и повышенной выходной мощностью.



Рис.7. Микросборка генератора с ДР фирмы JSB на 9,4 ГГц

Следует упомянуть компанию Narda Microwave – производителя высококачественных моделей генераторов типа FRDRO. Разработки фирмы отличаются пониженным до -90 дБн уровнем побочных спектральных компонент, широким диапазоном рабочих температур и герметичным исполнением. Они перестраиваются напряжением в пределах ± 10 МГц на средней частоте 3 ГГц при неизменном уровне $S_{\phi}(10 \text{ кГц}) \leq -90$ дБн/Гц.

Корпорация Raditek International предлагает несколько серий генераторных блоков с ДР для частот от 4,4 до 44 ГГц. В модули для частот выше 22 ГГц входят встроенные умножители частоты. Заказные модификации имеют механическую или электронную настройку в пределах 0,2–0,3% от средней частоты.

В продукции компании Nexup представлено несколько серий фазостабилизированных источников колебаний и автономных источников с ДР диапазона 0,5–23 ГГц, характеризующихся высокой стабильностью и низким уровнем фазовых шумов.

Английская фирма Atlantic Microwave предлагает серию генераторов с ДР для частот 3–14 ГГц. В них предусмотрена механическая перестройка частоты на 1%. Уровень $S_{\phi}(100 \text{ кГц}) \leq -135$ дБн/Гц для частоты 0,6 ГГц, и снижается до -105 дБн/Гц для частоты 14 ГГц. Поставляются модификации генераторов с электронной перестройкой частоты в пределах 0,2–0,5%. По заказу в эти блоки встраиваются умножители частоты, повышающие среднюю частоту до 30 ГГц, буферные усилители для повышения мощности и снижения влияния нестабильности нагрузки.

Корпорация Spectrum Microwave предлагает более 350 моделей генераторов. Среди них стабилизированные автономные ДР-генераторы с механической перестройкой на $\pm(10-20)$ МГц, с электронной перестройкой на ± 10 МГц при средней частоте 2,5–21 ГГц, а также фазостабилизированные генераторы.

Продукция корпорации Z-Communications включает около 30 базовых ГУН с ДР диапазона 1,4–6 ГГц. Модель CRO4260A при



Рис.8. Защищенный от вибраций и климатических воздействий модуль генератора с ДР модели DS-013-02 на частоту 13 ГГц фирмы Jersey Microwave

средней частоте 4,26 ГГц перестраивается напряжением 0,5–4,5 В на ± 10 МГц и имеет $S_{\phi}(10 \text{ кГц}) \leq -107$ дБн/Гц. Корпорация Communication Techniques (www.herley.com) производит высококачественные FR-генераторы с ДР диапазонов 3–18 ГГц с встроенной защитой по питанию, а также модели серии VTDRO-40 на фиксированную частоту 39,812 ГГц по стандарту SONET OC-768.

Следует отметить тенденцию к увеличению доли поставляемых на рынок конкурентоспособных СВЧ-генераторов с ДР, производимых фирмами Сингапура и Южной Кореи.

Развитие техники ДР позволило значительно повысить стабильность средней частоты и снизить уровень фазовых шумов источников колебаний в диапазоне от дециметровых до миллиметровых длин волн без применения многокаскадных схем умножения частоты, кварцевого генератора или сложных синтезаторов частот. Противоречие между стабильностью частоты и точностью установки ее номинала решается изготовлением ДР на заданную частоту и подстройкой частоты генерации в пределах (1–2)%. Среди мировых производителей источников колебаний СВЧ-диапазона развернулась острая конкуренция. В результате сегодня на рынке представлены производители различных ДР и сотни сопоставимых моделей генераторов на их основе. Правильный выбор компонентов с учетом всех показателей – непростая задача. К тому же приобретение нужного устройства затруднено необходимостью получения разрешения на покупку у страны-изготовителя и таможенной очистки. Для решения этих задач целесообразно воспользоваться услугами фирмы "Радиокомп" [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Khanna A.P.S. (Paul). Microwave Oscillators: The State of the Technology. An in-depth look at the past, present and future developments of microwave oscillator technology. – Microwave Journal, April 2006, v.49, N4, p.22.
2. РАДИОКОМП (Радиокомпоненты мировых производителей): www.radiocomp.ru