

Генераторы с применением диэлектрических резонаторов

Часть 2

УДК 621.389 | ВАК 05.27.01

В. Геворкян, к. т. н.¹, В. Кочемасов, к. т. н.², В. Шадский, к. т. н.³

В первой части статьи, опубликованной во втором номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2020 год, было рассказано об особенностях, основных характеристиках и методах расчета генераторов с диэлектрическими резонаторами. В данном номере рассматриваются возможные частотные диапазоны, конструктивное исполнение, типы и производители данных устройств.

ВОЗМОЖНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ДИАПАЗОНЫ АГДР

Частотный диапазон АГДР ограничен снизу размерами ДР, пропорциональными $\lambda\sqrt{\epsilon_r}$. Поэтому на частотах до ~1 ГГц рационально применять коаксиальные резонаторы (КР). Сверху диапазон применения ДР в АГ ограничен увеличением тангенса угла диэлектрических потерь материалов. При этом рациональные предельные значения частот АГДР не превышают 40–50 ГГц. На этих частотах образцы ДР с низшим видом колебаний из диэлектриков с относительной проницаемостью менее 20 представляют собой диски диаметром 1–2 мм при толщинах около 0,5 мм, что соизмеримо с размерами активных элементов и удобно для их конструктивного сочетания. При этом эффективные добротности таких резонаторов не превышают 1000 [8], что отрицательно сказывается на фазовых шумах генераторов. Тем не менее, в диапазоне частот до 50 ГГц известны удачные технические решения, например, АГДР (рис. 21) с выходной мощностью 20 мВт на частоте 37,5 ГГц с колебательной системой, показанной на рис. 22 [17], и генератор, работающий на частоте 37 ГГц, фирмы SAGE Millimeter [18]. Последний (рис. 23) [19] характеризуется выходной мощностью 13 дБм, диапазоном механической перестройки частоты ± 50 МГц, долговременной относительной стабильностью частоты $\pm 4 \cdot 10^{-6}$, спектральной плотностью фазовых шумов -95 дБн/Гц при отстройке от несущей на 100 кГц (примерно -75 дБн/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц). Размеры этого генератора – 64,77 × 33,78 × 28,70 мм.

Изменение характеристик АГДР по мере увеличения рабочей частоты можно проследить, анализируя данные табл. 6 для серии устройств, выпускаемых компанией MITEQ [20].

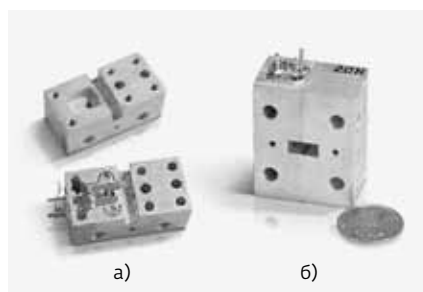


Рис. 21 АГДР 7-мм диапазона длин волн с размерами 32×20×14 мм в разобранном (а) и собранном (б) состояниях

Продвижение генераторов непрерывной мощности с ДР в более высокочастотную область реализуется производителями устройств с применением умножения частоты. При этом создание АГДР, рассчитанного на ту же частоту 37 ГГц, с применением умножения обеспечит спектральную плотность при отстройке на 10 кГц

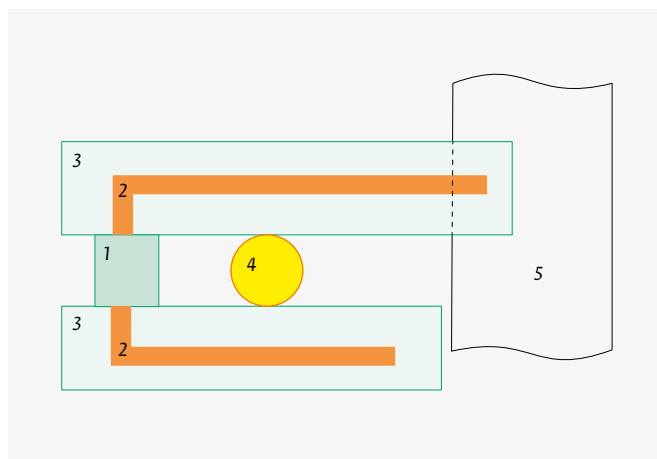


Рис. 22. Схематичное изображение колебательной системы генератора: усилитель 1; полосковые линии связи 2, размещенные на керамических подложках 3; ДР 4; переход в волновод 5

¹ НИУ «МЭИ», профессор.

² ООО «Радиокомп», генеральный директор.

³ АО «Микро-ВИС», заместитель генерального директора.



Рис. 23. 7-миллиметровый АГДР фирмы SAGE Millimeter

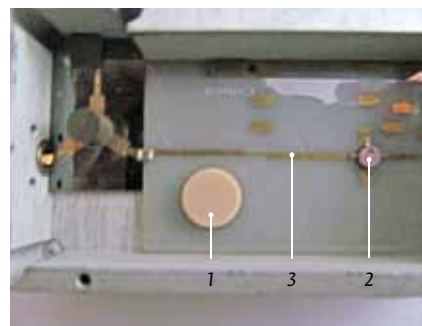


Рис. 24. Вид топологии транзисторного АГДР 4-см диапазона. 1 – ДР; 2 – биполярный транзистор; 3 – микрополосковая линия

около -74 дБн/Гц, то есть на уровне параметра непосредственно АГДР. Отсюда следует, что каскадно с автогенератором включенный умножитель частоты не дает преимуществ ни по уровню выходной мощности, которая уменьшается на каждой ступени умножения, ни по уровню фазовых шумов. Таким образом, применение умножителей лишь упрощает процесс проектирования, сокращая число разработок частотных литер АГДР.

КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ АГДР

Конструкция АГДР формируется из генерирующего узла и линии вывода мощности. Генерирующий узел обычно реализуется в микрополосковом исполнении и включает транзистор или другой усилительный элемент и ДР, установленный на держателе или подложке линии вблизи элемента связи (рис. 24). Общий вид конструкции АГДР определяется корпусом и видом линии вывода мощности

Таблица 6. Параметры АГДР фирмы MITEQ с механической перестройкой частоты в диапазоне температур от -20 до 70 °C

Частотный диапазон ($F_1 - F_2$), ГГц	2,4-3,7	3,7-4,8	4,8-6,5	6,5-8,8	8,8-12	12-16	16-18	18-24	24-26	26-33	33-40
Выходная мощность ($P_{\text{вых}}$), дБм	13						11				
Изменение $P_{\text{вых}}$ в диапазоне температур (ΔP_T), дБ	~ ±2								±1,5		
Уровень n-й гармоники относительно $P_{\text{вых}}$ на центральной частоте (P_n), дБн	~ -80										
Мощность интермодуляционных искажений относительно мощности на центральной частоте ($P_{\text{имд}}$), дБн	~ -20										
Диапазон механической перестройки частоты (ΔF_M), МГц	±3	±5	±10								
Зависимость частоты от напряжения питания (ΔF_U), кГц/В	10		15			20	25	30		40	50
Изменение частоты генерации трактом передачи мощности ($\Delta F_{\text{КСВ}}$), МГц	2		3	5				1			
ТКЧ, 1/°С	$5 \cdot 10^{-6}$										
Спектральная плотность фазовых шумов (σ_f), дБн/Гц*	-105		-95	-90	-85	-80			-75		-70
Потребляемая мощность (P_0), Вт**	1,5										
Потребляемый ток (I), мА**	150		120							200	

* При отстройке на 10 кГц от рабочей («несущей») частоты.

** Ориентировочные данные, усредненные по ряду образцов.

Рис. 25. Вид топологии транзисторного АГДР 2-см диапазона. 1 – ДР; 2 – полевой транзистор (ПТ); 3 – микрополосковая линия связи ПТ с ДР; 4 – микрополосково-коаксиальный адаптер

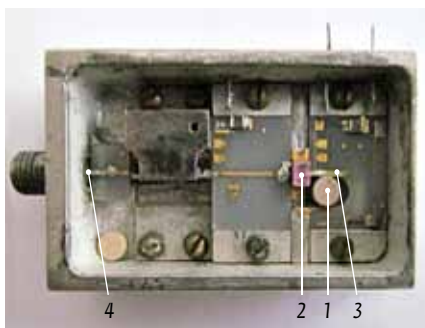


Рис. 26. Вид транзисторного АГДР 3-см диапазона с волноводным соединителем 23×5 мм



Рис. 27. АГДР 3-см диапазона длин волн с размерами 42×42×9 мм на основе диода Ганна в волноводном фланце 23×10 мм. 1 – диод Ганна в поперечном держателе 2; 3 – ДР

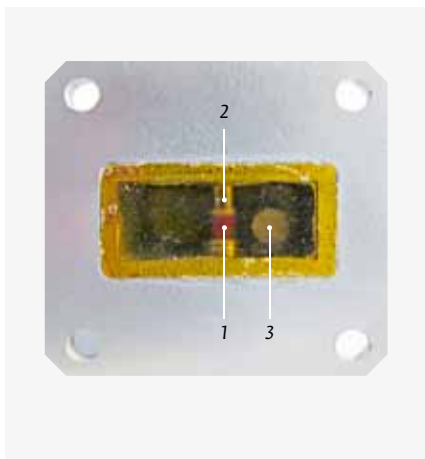
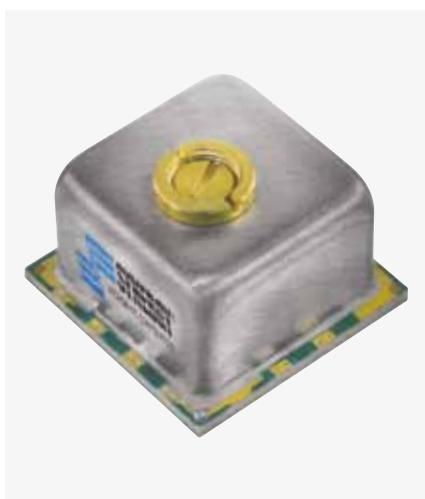


Рис. 28. АГДР для поверхностного монтажа фирмы Synergy Microwave Corporation с микрополосковой структурой на подложке с большим ϵ_r и обратной связью, образованной петлей Мебиуса



или соединителя. Чаще всего в АГДР применяется коаксиальный соединитель, а переход к нему от генерирующего узла осуществляется посредством микрополосково-коаксиального перехода (рис. 25). Реже для вывода мощности от генераторного узла применяют волновод, связь с которым обеспечивает микрополосково-волноводный переход (рис. 26). Волноводный вывод мощности АГДР характерен для диодных автогенераторов (рис. 27) и АГДР миллиметрового диапазона длин волн (КВЧ-диапазона). В последнее время широко применяют генерирующие узлы в виде структур с микрополосковыми линиями вывода мощности для поверхностного монтажа. Генератор, размещенный в корпусе с микрополосковым соединителем, показан на рис. 28 [18].

ТИПЫ И ПРОИЗВОДИТЕЛИ АГДР

АГДР широко представлены на зарубежном рынке [16, 17, 18, 21–49]. Обилие выпускаемых изделий определяется достаточно глубокой и всесторонней проработкой вопросов проектирования ДР разных типов и АГДР на их основе за прошедшие четыре десятка лет. Частотный диапазон автогенераторов с применением ДР низшего вида колебаний находится в пределах от 0,5 до 50 ГГц.

Генераторы с ДР могут быть как несинхронизированными – автогенераторами (free running), так и с синхронизацией (рис. 29) при включении в их состав системы ФАПЧ (phase-locked loop, PLL). Работа на частотах более 50 ГГц, а иногда и меньших, обеспечивается при дополнении автогенераторов умножителями частоты. Непосредственно автогенераторы представляют самостоятельный интерес, так как широко используются в большинстве радиоэлектронных устройств.

Генераторы фиксированных частот не предполагают перестройку частоты автоколебаний, хотя принципиально содержат элементы механической перестройки частоты ДР, которая ограничена требованиями ее технологической подстройки и обычно не превышает 0,5%. Простейший и практически единственный вариант такого элемента перестройки частоты ДР – диск, перемещаемый ортогонально плоскости стенки ДР (см. рис. 2). Диаметр диска может быть различным. При малых перестройках диск заменяют на металлические или диэлектрические стержни (штыри).

Элементы перестройки частоты вносят искажения в структуру полей ДР и приводят к дополнительным потерям, что уменьшает собственную добротность ДР и колебательной системы генератора в целом. При этом применение металлического элемента перестройки частоты понижает эффективную добротность ДР сильнее (см. табл. 2).

Внешний вид АГДР, типичные кривые зависимости частоты генерации от напряжения питания (рис. 30) [20], спектральные (рис. 31) [20] и иные электрические



Рис. 29. Классификация АГДР

характеристики АГДР разных производителей, работающих в одинаковых частотных диапазонах, практически одинаковы. Отметим также, что генераторы фиксированных частот и генераторы с механической перестройкой частоты генерации по внешнему виду между собой практически неотличимы.

Характеристики АГДР фиксированных частот разных производителей приведены в табл. 7.

Генераторы с механической перестройкой частоты отличаются от АГДР фиксированных частот только увеличением коэффициента связи элемента перестройки с ДР и, соответственно, увеличением диапазона перестройки частоты ДР.

Простейший вариант такого технического решения – увеличение диаметра диска перестройки. В этом случае

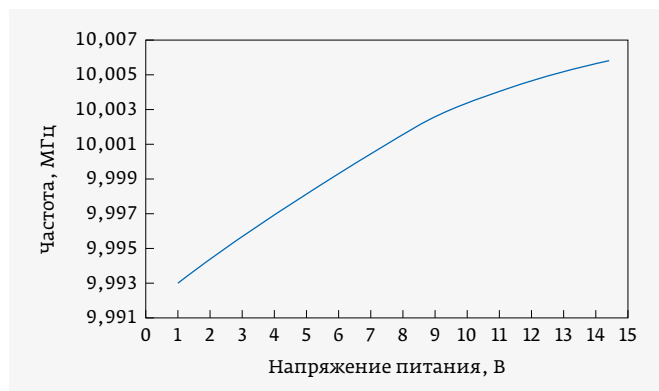


Рис. 30. Типичный вид зависимости частоты АГДР от напряжения питания на примере АГ, работающего на частоте 10 ГГц, фирмы MITEQ

изменение частоты имеет экспоненциальный характер при удалении элемента перестройки от поверхности ДР. Известный вариант широкополосной и одновременно линейной перестройки частоты АГДР (не менее 10%) достигается применением специфической (экспоненциального вида) формы поверхности элемента перестройки частоты ДР в колебательной системе автогенератора [50], повторяющей функцию убывания внешних полей ДР.

Динамику изменения параметров таких автогенераторов с ДР по мере увеличения их рабочей частоты можно проследить, анализируя табл. 8.

Температурно стабильные АГДР. Одна из важных характеристик АГДР – долговременная ста-

бильность частоты, которая в основном определяется ее температурной стабильностью, проявляющейся в малом дрейфе частоты генерации в рабочем температурном диапазоне. Она обусловлена постоянством резонансной частоты колебательной системы и реактивных элементов эквивалентной схемы замещения активного элемента. При реальной (не бесконечной) добротности колебательной системы температурная стабильность частоты автоколебаний может быть достигнута посредством взаимной температурной компенсации изменений свойств различных элементов.

Требуемые значения ТКЧ ДР обеспечиваются выбором определенных значений температурных коэффициентов относительной диэлектрической проницаемости (ТК ϵ_r) диэлектрика. Кроме того, возможно (и так делали

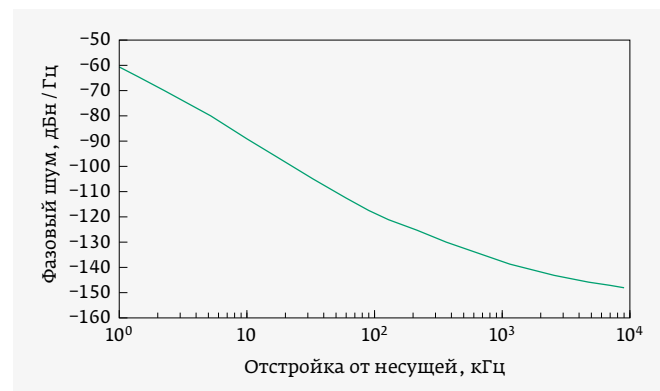


Рис. 31. Типичный вид спектра фазовых шумов АГДР на примере устройства АГ, работающего на частоте 10 ГГц, фирмы MITEQ

Таблица 7. Характеристики АГДР с фиксированной настройкой частоты

Фирма	Модель, серия	$F_1 - F_2$, ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	P_n , дБн	ΔF_U , кГц/В	$\Delta F_{\text{КСВ}}^*$, МГц	$\text{ТКЧ} \times 10^6$, 1/°C	σ_f^{**} , дБн/Гц
Crane Aerospace & Electronics	Серия 7110	0,75–2,90	>15	–	<2	0,04%	–	–
RADITEK	Серия RDRO	0,3–2,5	10	–70	20	5	5	–90
Kratos	F5080	5,0–7,999	13	<–70	2	0,05	1,5	–105
Kratos	F5120	8,0–1,999	13	<–70	2	0,1	1,5	–90
Kratos	F5180	12,0–18,0	13	<–70	4	0,15	1,5	–85
Nexyn Corporation	NXOSCR	0,5–3,2	>11	<–80	20	$\pm 0,5$	25	–128...–112
Bowei	Серия DRO	4,5–18,0	10–8	<–70	$2 \cdot 10^{-5}$ 1/В	$< \pm 1 \cdot 10^{-4}$	5,0–55	–105...–92
Narda Microwave	Серия NKO	18,0–32,0	>9	<–90	10	$< \pm 0,04\%$	–	–80...–65
PμT	PmTDRO-19	19,0	20	<–70	–	–	4	–90 (10 ГГц)***
AtlanTecRF	A90-04000	4,0	>15	<–80	–	–	< ± 5	–

* При КСВ=1,5.

** При отстройке от несущей на 10 кГц.

*** Здесь и в аналогичных столбцах в табл. 8 и 12 в скобках указана частота, которой соответствует данное значение.

Таблица 8. Характеристики АГДР с механической перестройкой частоты

Компания	Модель, серия*	$F_1 - F_2$, ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	P_n , дБн	ΔF_M , МГц	ΔF_U , кГц/В	$\Delta F_{\text{КСВ}}^{**}$, МГц	$\text{ТКЧ} \times 10^6$, 1/°C	σ_f^{***} , дБн/Гц
MITEQ	DRO	2,4–3,7	13	–80	± 3	10	2	5	–105
MITEQ	DRO	33,0–40,0	11	–80	± 10	50	1	5	–90
MITEQ	DPNDRO	4,5–7,5	10	–80	± 10	10	3	5	–90
MITEQ	DPNDRO	12,0–15,0	7	–80	± 10	20	5	7	–75
SAGE Millimeter	SOD	2,0–8,0	10–27	–80	± 5	–	–	± 2	–90
SAGE Millimeter	SOD	26,5–40,0	10–23	–65	± 25	–	–	25	–70
Nexyn Corporation	NXOSCR	0,5–3,2	11–20	<–80	–	–	0,5	± 3	–107
Nexyn Corporation	NXOS	6,0–18,0	11–20	<–80	25 (1% – опция)	20	$\pm 1,0$	1	–104...–90
Microwave Dynamics	DRO-1000	3,0–26,0	13–25	–85	100	10^{-5} 1/В	$> \pm 10^{-4}$	4	–107...–91
MCLI	DR-XXXX-XM	3,0–4,0	16	–80	>3%	10	± 1	5	–108
MCLI	DR-XXXX-XM	10,5–14,0	10	–80	>3%	5	$\pm 1,5$	5	–91
Spectrum Microwave	512133	3,0–4,0	10	–80	–	–	–	4	–117 (2 ГГц)

Таблица 8. Продолжение

Компания	Модель, серия*	F_1-F_2 , ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	P_n , дБн	ΔF_M , МГц	ΔF_U , кГц/В	$\Delta F_{\text{КСВ}}^{**}$, МГц	$\text{ТКЧ} \times 10^6$, 1/°С	σ_f^{***} , дБн/Гц
Spectrum Microwave	518040	15,0–16,0	10	–80	–	–	–	4	–96 (16 ГГц)
Ducommun Technologies	OFD	8,0–13,0	–	–70	–	–	–	±3	–80
Ducommun Technologies	OFD	18,0–26,5	–	–60	–	–	–	±3	–70
Kratos	DRO	3,0–4,5	14	–80	2%	10	±0,5	5	–
Kratos	DRO	12,0–18,0	12	–80	2%	40	±7	5	–
Kratos	SMDRO	7,5–10,5	14	–80	2%	20	±0,5	2,5	–90 (8 ГГц)
Kratos	SMDRO	10,5–16,0	14	–80	2%	30	±0,5	2,5	–80 (16 ГГц)
Remec****	MDR2100	2,5–6,0	10	–70	±10	$2 \cdot 10^{-5}$ 1/В	±10 ^{–4}	5	–105 (2,5 ГГц)
Remec****	MDR2560	4,5–16,0	10	–70	$\pm 1,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$ 1/В	$\pm 5 \cdot 10^{-6}$	5	–95 (7 ГГц); –82 (16 ГГц)
TRAK Microwave	OSC046	4,0–6,0	< 13	<–70	–	< 1	0,02%	5	–105
Princeton Microwave Technology	PmT-VTDRO	4,0–40,0	13	–80	–	–	–	4	–92 (10 ГГц)
Cernex	CDO	2,0–4,0	10–27	–80	–	–	–	5	–90
Cernex	CDO	18,0–26,5	0–2	–60	–	–	–	3	–75
AtlanTecRF	ASO-04000	4,0	15	<–80	±1,96	–	–	< ±5	–
AtlanTecRF	ASO-15000	15,0	13	<–80	±3,75	–	–	< ±5	–
PMI	DRO-9D7G-CD-1	9,7	16	<–55	25	<100	< ±4	–	–75
PMI	DRO-16D3G-CD-1	16,3	16	<–55	25	<100	< ±6	–	–70
API Technologies	518038	14,0–15,0	13	–80	–	–	–	6	–75... –73
RADITEK	RDRO-B-1,0-41,42 GHz	0,998–43,420	15–4	–90... –70	±0,82... ±34,00	51–2120	<0,205– 6,6200	–	–112... –80
Spectrum Microwave	MDR2100	2,5–21,0	10	–70	±10...±20	50–420	±0,25... ±2,10	< 5	–

* Для ряда моделей указаны общие части названий серий.

** При КСВ=1,5.

*** При отстройке от несущей на 10 кГц.

**** В настоящее время это фирма API Technologies.

Таблица 9. Характеристики АГДР с температурной компенсацией частоты различных фирм

Компания	Модель, серия	$F_1 - F_2$, ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	P_n , дБн	ΔF_M , МГц	ΔF_U , кГц/В	$\Delta F_{\text{КСВ}}$, МГц	$\text{ТКЧ} \times 10^6$, 1/°C	σ_f^* , дБн/Гц
MITEQ	TCDRO	6,5–8,8	17	–80	± 10	15	0,5	0,9	–85
MITEQ	TCDRO	33,0–40,0	11	–80	± 10	50	2,0	0,9	–65
Microwave Dynamics	TCDRO-1060	1,0–40,0	13–25	–75	–	< 1	<10 ^{–3}	0,1	–85
PMI	TCDRO 12G-CD-1	12,0	> 18	< –85	–	<15	<0,5	0,8	–90
PMI	TCDRO-16G-CD-1	16,0	>18	< –85	–	<15	<0,5	0,8	–80
Analog Devices	HMC-C200	8,0–8,3	13,5	< –85	$\pm 1^{**}$	5	0,005	2	–122

* При отстройке от несущей на 10 кГц.

** Электрическая перестройка.

в первое время при создании АГДР) применение различных, в основном механических, термокомпенсаторов изменений резонансной частоты ДР, например в виде биметаллических пластин, которые в процессе нагрева или охлаждения, искривляясь, придвигались или отодвигались от поверхности ДР, смещая его резонансную частоту в нужную сторону. Заметим, что управление частотой ДР в рабочем диапазоне температур с помощью выбора ТКЕ, отличается меньшим влиянием на добротность колебательной системы и потому более рационально.

По существу любой АГДР снабжен системой термостабилизации частоты генерации. Тем не менее в некоторых случаях предпринимаются более тонкие подстройки в устройствах термокомпенсации, что выделяет такие конструктивные решения АГДР в отдельный вид АГДР с температурной компенсацией частоты (табл. 9).

Типичные значения температурной стабильности частоты АГДР вне зависимости от частотного диапазона составляют порядка 10^{-6} 1/°C [20]. Значения параметров частотной термостабильности АГДР разных производителей показывают, что характеристики устройств практически не различаются.

Надо заметить, что реализация повышенной температурной стабильности, достигаемая с помощью различных компенсаторов, приводит к ухудшению эффективной добротности ДР и, соответственно, росту фазовых шумов. Поэтому АГ с ординарной температурной стабильностью (то есть без компенсации) обладают в среднем на 5 дБ меньшими фазовыми шумами.

Характерный вид температурной зависимости частоты сигнала АГДР с термокомпенсацией резонансной частоты ДР на примере генератора фирмы MITEQ [20] приведен на рис. 32 [15].

АГДР со сверхнизким уровнем фазовых шумов. В зарубежной аббревиатуре такие генераторы называют *Ultra Low Phase Noise DRO*. Как правило – это генераторы

фиксированных частот. К ним относятся, например, АГ с фазовыми шумами до –125 дБн/Гц при отстройке на 10 кГц от несущей частоты 8 ГГц фирмы Hittite Microwave Corporation [25] (в настоящее время – Analog Devices). Генераторы этого класса проще всего реализуются на отдельных частотах рабочего диапазона биполярных транзисторных СВЧ-генераторов с использованием дополнительно к внешним – внутренним обратных связей АЭ. Это позволяет на основе ДР с низшим видом колебаний даже при эффективной добротности 1000–3000 достичь очень высокой кратковременной стабильности. Внешний вид таких генераторов практически не отличается от типичных АГДР (см., например, рис. 33 [17, 18] и рис. 34 [9] в сравнении с рис. 14). Более интересны характеристики АГДР такого же класса фирмы Synergy Microwave Corporation [18], но в варианте для поверхностного монтажа. Например,

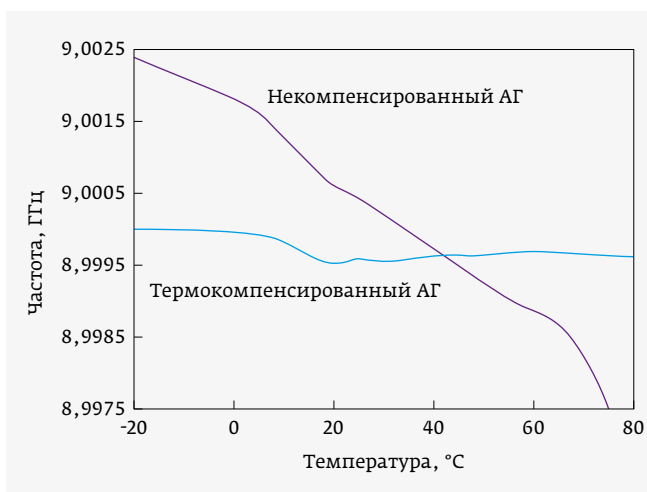


Рис. 32. Типичный вид температурной зависимости частоты сигнала АГДР с термокомпенсацией изменения частоты генерации

SDRO1000-8, который представляет собой генератор с механически перестраиваемой частотой генерации ДР, работающий на частоте 10 ГГц. В нем предусмотрена также варакторная перестройка частоты на 50 МГц путем изменения напряжения от 1 до 15 В (с крутизной 0,4 МГц/В). Генератор обладает фазовыми шумами -107 дБн/Гц

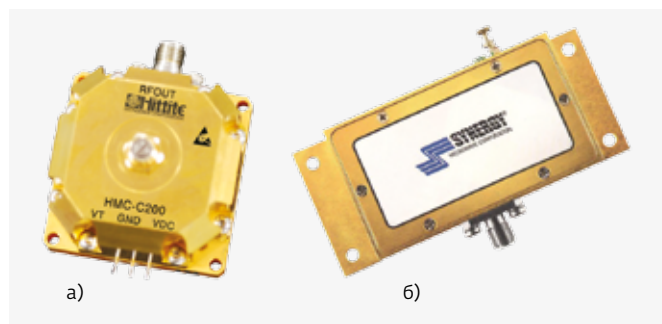


Рис. 33. Внешний вид АГДР со сверхнизким уровнем фазовых шумов: а – модель HMC-C200 фирмы Hittite Microwave Corporation [17] (корпорация Analog Devices); б – модель DRO100 фирмы Synergy Microwave Corporation [18]



Рис. 34. Сверхмалозумящий АГДР фирмы Exodus Dynamics серии EDRO-1000-XX.XX с выходной мощностью 1 Вт на частоте 10 ГГц с TTL системой управления выходной мощностью в пределах 19 дБ (при напряжении -3 В) с питанием 360 мА при 12 В



Рис. 35. Внешний вид АГДР фирмы Microwave Dynamics: а – с механической подстройкой частоты; б – с механической и электрической подстройкой частоты

при отстройке на 10 кГц от центральной частоты. Важно и то, что генератор работает в диапазоне температур от -15 до 75 °С.

Современные ГУН с ДР. Современные ГУН с ДР разных производителей внешне похожи на АГДР с механической перестройкой частоты. Это видно из сравнения устройств, приведенных на рис. 35 [34], где на рис. 35а представлен АГДР с механической подстройкой частоты, а на рис. 35б – АГДР обладающий и электрической перестройкой. Более того, как правило, всякий ГУН принципиально снабжен элементом механического управления частотой (точнее, резонансной частотой ДР) для вывода устройства в рабочую частотную точку. Частотные зависимости характеристик ГУН ведущих производителей практически одинаковы и соответствуют представленным в табл. 10 [49] и на рис. 36 [51], а характеристики ГУН разных фирм приведены в табл. 11.

Таблица 10. Параметры ГУН серии DR на основе АГДР фирмы MCLI с комбинированной (электрической и механической) системой перестройки частоты в диапазоне температур $-40...85$ °С

$F_1 - F_2$, ГГц	3,0-4,0	4,0-5,8	5,9-7,9	8,0-10,5	10,5-14,0
ΔF_M , %	3				
ΔF_3^* , %	0,2-0,3				
$P_{\text{вых}}$, дБм	16	16	15,5	15	10
$P_{\text{имд}}$, дБн	-80				
P_n , дБн	-20				

* ΔF_3 – диапазон электрической перестройки частоты.

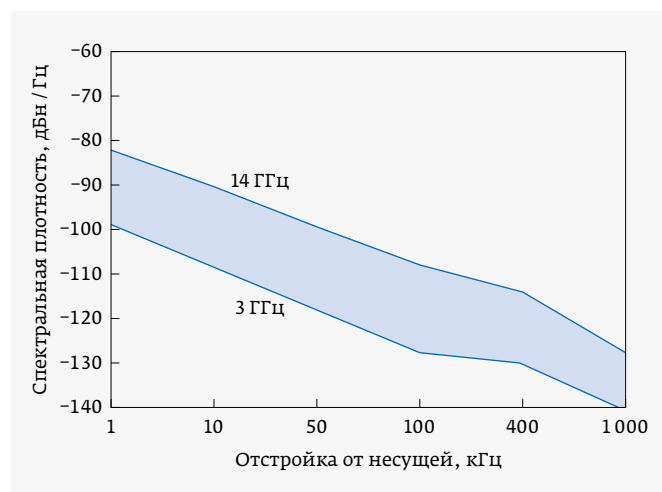


Рис. 36. Область возможных значений спектральной плотности фазовых шумов ГУН на основе АГДР фирмы MCLI (для различных значений рабочей частоты)

Таблица 11. Характеристики АГДР с электрической перестройкой частоты

Компания	Модель, серия	F_1-F_2 , ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	ΔF , МГц	P_n , дБн	ΔF_U , кГц/В	$\Delta F_{\text{КСВ}}$, МГц	$\text{ТКЧ} \times 10^6$, 1/°C	σ_f , дБн/Гц
MITEQ	DRO-X-XXXXX-VT-ST	6,5-26,0	13-1	10-25	-80	15-30	5	$\pm 1... \pm 1,5$	-85...-75
SAGE Millimeter	SOD	2,0-40,0	27-10	$\pm 2... \pm 10$	-80...-65	-	-	$\pm 2... \pm 3$	-90...-70
Nexyn Corporation	NXOS-EFC-0956-02457	9,5625	10	40-60	-	$\leq \pm 200$	± 1	20	-96
MCLI	DRXXX	3,0-14,0	16-10	(0,2-0,3)%	-80	10-5	$\pm 1... \pm 1,5$	5	-108...-91
Synergy Microwave Corporation	DRO80	8,0	8	≤ 30	-	-	-	2	-114
Synergy Microwave Corporation	DRO100	10,0	8	≤ 45	-40	-	-	2	-111
Synergy Microwave Corporation	DRO1024-8	10,2400	-2	6	-	500	0,5	2	-111
Spectrum Microwave	MDR3100	2,5-28,0	10	2-17	-70	50-560	$\pm 0,25... \pm 2,8$	5	-103...-65
Spectrum Microwave	NDR3001-02	9,95328	11	$> \pm 7,5$	< -80	5	$\pm 0,1$	3	-
Kratos	VTDRO-9302	9,95328	1	~ 10	-65	-	-	± 5	-86
Kratos	VTDRO-40	39,81200	5	100	-	< 200	$< 0,5$	-	-60
Analog Devices	HMC-C200	8,2	13,5	± 1	-	5	$5 \cdot 10^{-3}$	2	-122
TRAK Microwave	OSC040	26,550	10	~ 14	-70	< 250	0,025	± 7	-85
Z-Communications	DRO8450A	8,450	2	~ 6	-	< 1000	1	-	-103
Z-Communications	DRO12600A	12,600	0	~ 6	-	< 1000	1,5	-	-102
Norden Millimeter	ND5P05F	5,0	5	2,0	-	-	-	-	-110
Norden Millimeter	ND16P05F	16,0	5	6,4	-	-	-	-	-100
RADITEK	RDROH	4,0-18,0	13-12	-	-80	-	$\pm 1... \pm 2$	5	-100...-85
RADITEK	RDRO-B-1,0-41,42 GHz	0,998-43,420	12-15; 4-8	0,35-14,5	-	5,1-2,20	0,205-8,48	-	-112...-80
PμT	PmT-DRO-SM	6,0-24,0	13	± 5	-60	-	-	$\pm 0,05\%$	-80
PμT	PmT-DRO-6100	18,0-40,0	13	± 5	-60	-	-	$\pm 0,05\%$	-80
UMS	CHV2240-991	38,2	9	5	-	-	-	-	-100***
Spectrum Microwave	MDR2100	2,5-21,0	10	-70	$\pm 10... \pm 20$	50-420	$\pm 0,25... \pm 2,10$	< 5	-

* При КСВ=1,5.

** При отстройке от несущей на 10 кГц.

*** При отстройке от несущей на 100 кГц.

Таблица 12. Характеристики АГДР с комбинированной (механической и электрической) перестройкой частоты

Фирма	Модель, серия	Диапазон частот, ГГц	$P_{\text{вых}}$, дБм	ΔF_M , МГц	ΔF_{Σ}^* , МГц или %	Управляющее напряжение, В	P_n , дБн	ΔF_U , кГц/В	$\Delta F_{\text{КСВ}}^*$, МГц	$\text{ТКЧ} \times 10^6$, 1/°C	σ_f^{**} , дБн/Гц
Resotech	DRO-xxxx-EM	4,0–7,9	14,5	3%	(0,2–0,3)%	0–30	<–80	10	< ±3	5	–90 (7 ГГц)
Resotech	DRO-xxxx-EM	8,0–13,0	14	3%	(0,2–0,3)%	0–30	<–80	10	< ±0,4	5	–85 (10 ГГц)
Lucix	LO-0102-F8B	0,098–1,049	12–15	±0,8	0,614–0,819	0,6–11,4	–	51	0,138	–	–117
Lucix	LO-0.81-FB	0,098–8,389	12–15	±6,6	2,8	0,6–7,4	–	10	1,64	–	–94
Lucix	LO-423-FB	41,33–43,42	4–7	>±34,0	14,5	0,6–7,4	–	10	8,48	–	–80
AtlanTecRF	–	2,5–15,0	5–15	> 4%	< 2%	0–30,0	–80	5–200	± 0,1	±2	–108...–90 (3–11 ГГц)
SAGE Millimeter	Серия SOD	2,0–40,0	10–27	±5...±25	±2...±10	0–10	–90...–70	–	–	±2...±3	–
API Technologies	MDR3001-03	10,667	11	±25	±7,5	1,5–11,0	<–80	5	±0,1	3	–110****
API Technologies	MDR3001	2,5–21,0	10	±10	(0,8–0,5)%	2–10	<–70	$2 \cdot 10^{-4}$ 1/B***	±10 ^{–4} ****	5	–103...–83 (3–20 ГГц)
Bowei	DRVCO	4,5–18,0	10–8	±10...±20	±5...±10	1–11	<–70	$2 \cdot 10^{-4}$ 1/B***	±10 ^{–4} ****	5,0–5,5	–120...–105
MCLI	DR-xxxx-XM	3,0–14,0	16–10	> 3%	(0,2–0,3)%	0–30	<–80	10–5	±1,0...±1,5	5	–108...–91
Nexyn Corporation	NXOS-EFC-0956-02457	9,5625	10	>±20	40–60	0–10	–75	<±200	<±1	< ±200 кГц/°C	<–96****
Nexyn Corporation	NXOS-EFC	3,0–18,0	12–8	>±25	> 6–8	1–15	–75	20	± 0,5	< ± 3...±5	–95...–82
Kratos	Серия SMDRO	7,5–16,0	14	< 2%	<0,2%	1–15	–80	20–30	± 0,5	2,5	–90...–80
Kratos	Серия DRO	2,5–19,0	14	2%	(0,15–0,25)%	1–12	–80	10–40	±0,5...±7,0	5	–
RADITEK	Серия RDRO-B-1.0–43.42 GHz	0,998–42,420	15–4	0,82–34,00	0,35–14,5	0,6–7,4	–95...–70	51–2120	0,205–8,480	–	–112...–80
RADITEK	Серия RDRO H	4,0–18,0	13–12	2%	–	1–12	–80	–	± 1,0...±2,0	5	–100...–85
MITEQ	VT-ST	2,4–40,0	13–11	±3... ± 10	>8–40	–	–80	–	–	–	–
Bowei	Серия DRVCO	4,5–18,0	10–8	> ± 10... ± 20	± 5... ± 10	–	–70	–	–	–	–
MCLI	DRO-XXXX-EM	3,0–14,0	16–10	>3%	(0,2–0,3)%	–	–80	–	–	–	–
Synergy Microwave Corporation	DRO-100	10,0	>8	20	6	1–15	–40	–	–	2	–111

* При КСВ=1,5.

** При отстройке от несущей на 10 кГц.

*** Относительное изменение ($\Delta f/f$).

**** При отстройке от несущей на 100 кГц.



Рис. 37. АГДР с микрополосковыми соединителями (модель DPNDRO-FB-06500-ST фирмы MITEQ)

Кроме ГУН производят АГДР с комбинированной (то есть и электрической, и механической, доступной в процессе эксплуатации, а не только изготовителю устройства) перестройкой частоты. Причем такие АГДР имеют характеристики практически одинаковые с ГУН (ср. данные табл. 11 и 12).

Это объясняется тем, что основное влияние на свойства колебательной системы АГ (в основном на ее добротность) оказывает добротность варакторного диода, а не элемент механической перестройки частоты.

АГДР для поверхностного монтажа. Заметим, что в последние годы больший интерес производителей сосредоточен на конструкциях с микрополосковыми выводами (рис. 29, рис. 37 [16]), отличающихся более низкой стоимостью. Вид соединителя не влияет на параметры АГДР. Так, АГДР, показанный на рис. 29, обладает чрезвычайно низким уровнем фазовых шумов (-115 дБн/Гц при отстройке на 10 кГц от центральной частоты генерации). Изделие, представленное на рис. 37, характеризуется средним уровнем шумов, соответствующим сантиметровому диапазону длин волн (от 4,5 до 15 ГГц). Более ранний (по времени создания) АГДР (MODRO-40G фирмы Milli Optics Inc. [46], в настоящее время снятый с производства из-за исчезновения производителя), хотя и имеет высокий уровень фазовых шумов (-70 дБн/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц), но это связано с более высокими рабочими частотами и особенностями элементной базы изделия.

Отметим, что АГДР ведущих фирм практически идентичны не только по комплексу параметров, но и по внешнему виду. Это видно из сравнения внешнего вида АГДР разных фирм и является следствием хорошо отработанной технологии их создания. Конструктивное подобие – результат ограниченного выбора вариантов возможно включения активного элемента или транзистора в цепь АГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алексейчик Л. В., Бродуленко И. И., Геворкян В. М., Казанцев Ю. А., Парышкуро Л. А.** Состояние и перспек-

тивы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в радиоэлектронике. Часть II. Пассивные и активные СВЧ-устройства с миниатюрными диэлектрическими резонаторами // *Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ.* Вып. 2 (865). 1982. 66 с.

2. **Геворкян В., Кочемасов В.** Объемные диэлектрические резонаторы – основные типы, характеристики, производители. Часть 1 // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес.* 2016. № 4. С. 62–76.
3. **Liang E. C.** Characterization and modeling of high Q dielectric resonators // *Microwave Journal.* Nov. 2016. P. 68–86.
4. Диэлектрические резонаторы / Под ред. проф. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. 328 с.
5. **Белов Л., Хилькевич В.** Генераторы с диэлектрическими резонаторами для стабилизации частоты // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес.* 2006. № 7. С. 54–59.
6. **Абраменков А. И., Бродуленко И. И., Геворкян В. М., Ковтунов Д. А.** Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в перестраиваемых полупроводниковых генераторах / Под ред. Геворкяна В. М. – *Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ.* Вып. 5 (1359). 1988. 70 с.
7. **Amir Effendy Muhammad-Affif, Widad Ismail.** High Tuning Sensitivity Dielectric Resonator Oscillator From Optimization of Dielectric Resonator TE01δ Mode. Technical Feature // *Microwave Journal.* October 2011. P. 128–142.
8. **Бунин А. В., Вишняков С. В., Геворкян В. М., Казанцев Ю. А.** Проектирование колебательной системы генератора миллиметрового диапазона длин волн // 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2005), г. Севастополь, 12–17 сентября 2005 г. Том 2. Доклад № 106. С. 465–467.
9. **Алексейчик Л. В., Бродуленко И. И., Геворкян В. М., Казанцев Ю. А., Парышкуро Л. А.** Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в радиоэлектронике. Часть I. Параметры миниатюрных диэлектрических резонаторов на СВЧ и методы их расчета // *Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ.* Вып. 13 (832). 1981. 97 с.
10. **Геворкян В. М., Казанцев Ю. А., Михалин С. Н.** Анализ СВЧ резонансной цепи с электрической перестройкой частоты с применением программы DesignLab 8.0 // *Труды МКЭЭ-2018.* Сент. 24–28, 2018. Крым, Алушта. – М.: ЗНАК, 2018. С. 381–386.
11. **Бунин А., Вишняков С., Геворкян В.** Проектирование генератора миллиметрового диапазона длин волн // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес.* 2008. № 6. С. 106–110.
12. Free Running Dielectric Resonator Oscillator. Ultra Low Noise Microwave Signal Source Интернет-ресурс <http://exodusdynamics.com/wp/wp-content/uploads/2014/10/EDRO-1000.pdf>

13. DRO Introduction REMEC. – Интернет-ресурс <http://micro.apitech.com/>
14. **Güttich U.** Active Elements Used in Microstrip Dielectric Resonator Oscillators // Microwave Journal. April 1996. P. 92–96.
15. Phase-Locked Oscillator Products (Basic product description). Интернет-ресурс http://www.luffresearch.com/Phase-Locked_Oscillators.html
16. DRO Application Note D-104: Phase-Locked DRO Characteristics. – Интернет-ресурс <http://micro.apitech.com/>
17. Hittite Microwave Corporation. Интернет-ресурс www.hittite.com
18. Synergy Microwave Corporation. Интернет-ресурс www.synergymwave.com
19. SOD-37301213-22-S1 Dielectric Resonator Oscillator, 37 GGz; ± 13 dBm. SAGE Millimeter, Inc. – Microwave Journal February 13, 2014.
20. MITEQ. Интернет-ресурс www.miteq.com
21. Atlantic Microwave Ltd. (бренд AmRF). Интернет-ресурс www.amrf.co.uk
22. Linear Technology. Интернет-ресурс www.linear.com
23. STC Microwave Systems-Olektron (Crane Aerospace & Electronics). Интернет-ресурс www.craneae.com
24. General Microwave Corp (Herley Industries Incorporated). Интернет-ресурс <http://www.kratosmed.com/gmcatalog>
25. JSB Service Company. Интернет-ресурс www.jsbservice.com
26. Pascall Electronics Ltd. Интернет-ресурс www.pascall.co.uk
27. TRAK Microwave. Интернет-ресурс www.trak.com
28. Rodelco Electronics Corp. Интернет-ресурс www.rodelco-usa.com
29. Magnum Microwave Corp. Интернет-ресурс <http://micro.apitech.com/>
30. Delphi Components, Inc. (Aura Systems Inc.). Интернет-ресурс www.aurasystems.com
31. Microwave Dynamics. Интернет-ресурс www.microwavedynamics.com
32. Communication Techniques, Inc. (Herley Industries Incorporated). Интернет-ресурс <http://www.kratosmed.com/>
33. Amplus Communication Pte Ltd. Интернет-ресурс www.amplus.com.sg
34. Nexyn Corporation. Интернет-ресурс www.nexyn.com
35. Jersey Microwave Limited. Интернет-ресурс www.jerseymicrowave.com
36. Spectrum FSJ Microwave. Интернет-ресурс www.specwave.com
37. Lucix Corporation. Интернет-ресурс www.lucix.com
38. RADITEK. Интернет-ресурс www.raditek.com
39. KoSpace Co. Ltd. Интернет-ресурс www.kospace.com
40. Elcom Technologies Inc. Интернет-ресурс <https://fei-elcomtech.com/>
41. Luff Research, Inc. Интернет-ресурс www.luffresearch.com
42. Princeton Microwave Technology, Inc. Интернет-ресурс www.princetonmicrowave.com
43. Narda Microwave. Интернет-ресурс www.nardamicrowave.com
44. Remec Magnum. Интернет-ресурс <http://micro.apitech.com/>
45. Herley Industries Inc. Интернет-ресурс <http://www.kratosmed.com/>
46. Milli Optics Inc. Интернет-ресурс <https://www.microwavejournal.com/articles/print/814-new-products>
47. Herley-CTI. Интернет-ресурс <http://www.kratosmed.com/>
48. CTI Industries. Интернет-ресурс www.ctiind.com
49. Microwave Communications Laboratories, Inc. (MCLI). Интернет-ресурс www.mcli.com
50. **Абраменков А. И., Геворкян В. М.** Перестраиваемый фильтр на диэлектрическом резонаторе. Авт. свид. № 1185439 (СССР) от 2.11.79. МКИ H01P 1/20. БИ № 38, 15.10. 85.
51. **Мальцев В. А., Мякиньков В. Ю., Рудый Ю. Б., Горюнов И. В., Гусев А. П., Лебедев В. Н., Тыртышников А. В., Чугуй А. П.** Твердотельные СВЧ генераторы малой мощности (к 60-летию ФГУП «НПП «ИСТОК»). – Интернет-ресурс <http://nauchebe.net/2012/04/tverdotelnye-svch-generatory-maloj-moshhnosti-k-60-letiyu-fgup-npp-istok>



Портативные анализаторы спектра и генераторы сигналов
www.radiocomp.ru

Signal Hound®

10 лет Оперативная техническая поддержка
на рынке радиоэлектроники

Эксклюзивные поставки
Низкие цены

РАЗРАБОТКА
ПРОИЗВОДСТВО
ИСПЫТАНИЯ
ПОСТАВКА
РАДИОКОМП