

# Генераторы с применением диэлектрических резонаторов\*

## Часть 1

УДК 621.389 | ВАК 05.27.01

В. Геворкян, к. т. н.<sup>1</sup>, В. Кочемасов, к. т. н.<sup>2</sup>, В. Шадский, к. т. н.<sup>3</sup>

Генераторы с диэлектрическими резонаторами (ДР) широко используются в СВЧ-устройствах. Они обладают рядом особенностей и преимуществ по сравнению с другими типами генераторов. Основные типы современных генераторов с ДР, а также характеристики используемых в них резонаторов рассматриваются в статье.

**А**втогенераторы (АГ) с применением колебательных систем (КС) на основе диэлектрических резонаторов (ДР) – АГДР (в зарубежной аббревиатуре – DRO) появились в устройствах электронной техники в начале 70-х годов прошлого века в качестве малогабаритных стабильных источников СВЧ-колебаний с низковольтными источниками питания. Этому способствовало практически одновременное появление первых твердотельных источников СВЧ-мощности – диодов Ганна и температурно стабильных ДР из керамических диэлектриков с собственной добротностью, превышающей добротность объемных полых резонаторов [1].

Эффективность применения ДР в твердотельных устройствах объясняется комплексом уникальных характеристик, поддерживающих преимущества твердотельной активной элементной базы – СВЧ диодов и транзисторов. Это сочетание малых размеров  $l$  (порядка  $\lambda/\sqrt{\epsilon_r}$ , где  $\lambda$  – длина волны в воздухе,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость керамики, обычно превышающая 10), высокой собственной добротности  $Q$ , которая в прошлом столетии была на уровне нескольких тысяч, а в настоящее время – в несколько раз выше [2], а также широкий спектр возможных значений температурных коэффициентов частоты (ТКЧ)  $\tau_f$  (зависящих от температурных коэффициентов относительной диэлектрической проницаемости ТК $\epsilon$ ), включая нулевые значения. Кроме того, структура внешних полей ДР обеспечивает простоту реализации его электромагнитной связи с линиями передачи любого вида, при этом ДР достаточно легко устанавливается в колебательные системы различных

конструкций. АГДР, предназначенные для работы в СВЧ-устройствах коммерческого и военного применения, обычно основаны на ДР с низшим поперечным электрическим видом колебаний (называемым Transverse Electric (TE) modes [1]).

Наряду с достоинствами, ДР присущ недостаток – густота спектра собственных колебаний и относительная близость не используемых (паразитных) видов колебаний к низшему полезному виду. Это свойство у ДР более выражено, чем у объемных полых резонаторов. Известные приемы разрежения спектра вблизи рабочего вида колебаний, среди которых наиболее приемлемым является правильный выбор отношения поперечного размера образца ДР к его толщине (в пределах 3–4), лишь частично решают задачу сдвига паразитных колебаний. Густота спектра собственных колебаний ДР вблизи частоты низшего вида затрудняет его применение в селективных СВЧ-устройствах. В случае применения ДР в колебательных системах автогенераторов проблема большого числа относительно близких частот спектра собственных видов колебаний ДР не является столь важной. Спектр автоколебаний дополнительно ограничен требованием выполнения условий балансов амплитуд и фаз в цепи обратной связи автогенератора.

## СВОЙСТВА СОВРЕМЕННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

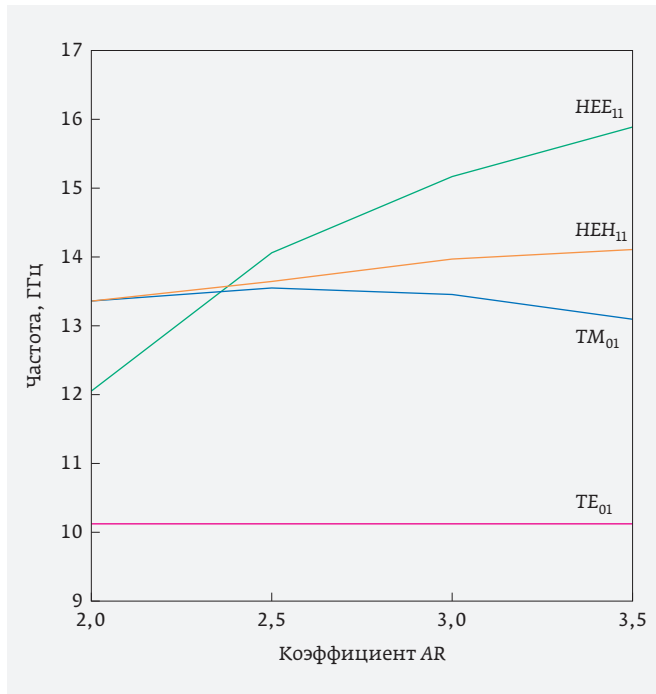
Несмотря на всестороннюю изученность свойств ДР, выполненных из различных диэлектриков и резонирующих на разных видах колебаний (см., например, [1, 2]), в настоящее время продолжают появляться публикации, иллюстрирующие конкретные характеристики таких резонаторов. Так, в [3] приводятся сведения о свойствах ДР фирмы MCV. К примеру, расчетная зависимость (рис. 1) спектра частот низших видов колебаний трехсантиметрового дискового ДР из материала

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (уникальный идентификатор: RFMEFI60719X0324).

<sup>1</sup> НИУ «МЭИ», профессор.

<sup>2</sup> ООО «Радиокомп», генеральный директор.

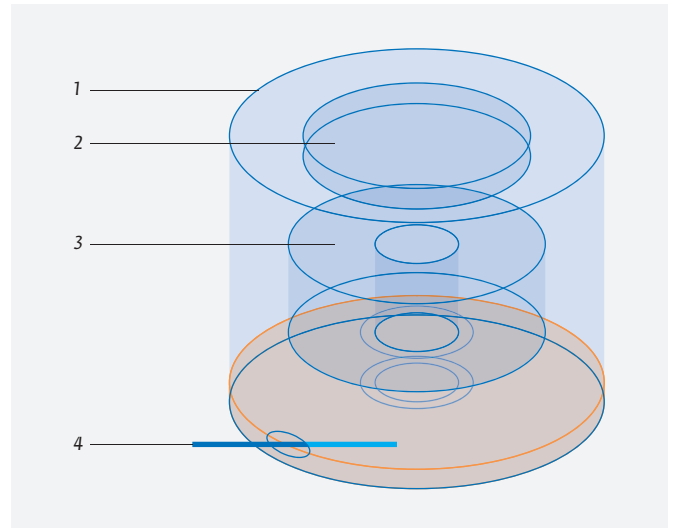
<sup>3</sup> АО «Микро-ВИС», заместитель генерального директора.



**Рис. 1.** Расчетная зависимость спектра частот низших видов колебаний трехсантиметрового дискового ДР от коэффициента AR

с  $\epsilon_r = 30$  и специфическим параметром  $Q \cdot f = 150\,000$ , где  $Q$  – добротность, а  $f$  – резонансная частота ДР в ГГц, показывает зависимость взаимной расстройки частот колебаний разных видов от отношения диаметра  $D$  дискового ДР к его толщине  $t$  (коэффициента AR (Aspect Ratio) =  $D/t$ ).

При сравнимых добротностях, ДР имеют практически на порядок меньшие размеры в сравнении с объемными волноводными резонаторами (табл. 1). Заметим, что, помимо  $\text{tg } \delta$  материала диэлектрика, добротность ДР определяют и радиационные потери [1, 2], для снижения которых применяют экранирование. При этом расстояние до стенок экрана от поверхностей тела ДР влияет на вносимые в колебательную систему тепловые потери, которые убывают с увеличением этого



**Рис. 2.** Условный вид колебательной системы с ДР с цилиндрическим экраном, возбуждаемой коаксиальной линией: 1 – экранируемая полость; 2 – диск перестройки частоты ДР; 3 – ДР; 4 – элемент возбуждения колебаний ДР

расстояния. Приемлемое на практике расстояние до стенок экранов от поверхностей ДР в 3–4 раза больше наименьших размеров ДР. Это увеличивает размеры колебательных систем с ДР (рис. 2). Связь с такой колебательной системой осуществляется посредством отрезка центрального проводника коаксиальной линии, введенного в полость экрана.

Диск над ДР (позиция 2 на рис. 2) предполагает перестройку его собственной (резонансной) частоты. В конструкциях АГДР наряду с ДР в экранируемой полости часто располагают и активный элемент (АЭ). При этом экранируемая полость образует корпус генератора.

Кроме низших видов колебаний, применяют ДР с высшими видами колебаний, именуемыми «шепчущей галереей» [4]. Такие ДР обычно делают на основе монокристаллов лейкосапфира (разновидность корунда  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) или ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ). Они характеризуются на порядок более высокой собственной

**Таблица 1.** Значения добротностей  $Q$  и объемов  $V$  полого и диэлектрических резонаторов на частотах от 2 до 10 ГГц

Тип резонатора и вид колебания	Частота низшего вида колебаний					
	2 ГГц		5 ГГц		10 ГГц	
	$Q$	$V, \text{ см}^3$	$Q$	$V, \text{ см}^3$	$Q$	$V, \text{ см}^3$
Прямоугольный полый резонатор	18 361	395	11 281	36,1	8 373	4,4
Диэлектрический резонатор, $TE_{018}$ при $\epsilon_r = 30$	32 529	75	16 500	5	9 500	0,54
Диэлектрический резонатор, $TE_{018}$ при $\epsilon_r = 45$	15 412	43	7 003	3,2	3 764	0,33

добротностью (100 тыс. и больше), но используются, как правило, для создания генераторных устройств, предназначенных для лабораторного применения. Это объясняется плохой температурной стабильностью, высокой чувствительностью к механическим воздействиям и вибрации ввиду больших габаритов и массы их колебательных систем. В данной работе ограничимся анализом устройств на базе ДР с низшим и близких ему видами колебаний.

Колебательные системы с ДР применяются в генераторах как фиксированной, так и перестраиваемой частоты, малой, средней и большой мощности. Наибольший интерес представляют АГДР с применением высокодобротных миниатюрных термостабильных ДР в сочетании с маломощными активными элементами. Фазовые шумы таких генераторов определяются формулой Лисона [5, 6]:

$$S_{\varphi}(F) = \frac{N_0 k T}{2P} \left[ 1 + \left( \frac{1}{2Q_s} \right)^2 \left( \frac{f_0}{F} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $N_0$  – коэффициент шума активного элемента;  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $P$  – мощность автоколебаний,  $Q_s$  – эффективная полная добротность колебательной системы,  $f_0$  – центральная (несущая) частота,  $F$  – отстройка от центральной частоты автогенератора.

В качестве активных элементов в АГДР применяются полупроводниковые генераторные СВЧ диоды и транзисторы. Из диодов чаще – диоды Ганна,

и реже – лавинно-пролетные диоды (ЛПД). Частотный диапазон применения СВЧ-диодов начинается с единиц гигагерц, а сверху ограничен 50–60 ГГц.

Среди диодных структур лучшими шумовыми характеристиками обладают диоды Ганна. Их преимущество перед лавинно-пролетными диодами в уровне фазовых шумов составляет до 30 дБ/Гц при одинаковых отстройках от несущей частоты. Достоинства автогенераторов на ЛПД заключаются в более высоких (на порядок) уровнях выходной мощности и КПД. Тем не менее ДР в генераторах на ЛПД применяют редко.

В диапазоне частот до 10 ГГц используются биполярные транзисторы. Верхняя граница обусловлена физическим пределом создания таких структур. Полевые транзисторы применяют, начиная с нескольких гигагерц.

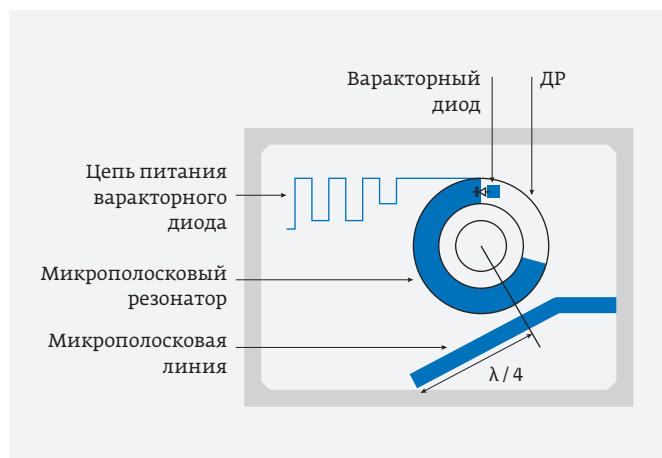
Транзисторные активные элементы по сравнению с диодными имеют более низкие собственные шумы. Лучшими по уровню шумов являются биполярные структуры. На частотах выше 10 ГГц АГДР на биполярных транзисторах находят применение в сочетании с умножителями частоты.

Все колебательные системы на ДР содержат элемент связи между ДР и активным элементом. Чаще всего в качестве элемента связи используется квази сосредоточенный отрезок линии (т. е. малой эквивалентной электрической длины), а также различные штыри и петли.

Простейшие колебательные системы реализуются в АГДР на основе СВЧ-диодов. При этом колебательную систему образует связанный с ДР эквивалентный отрезок длинной линии. Такие колебательные системы обеспечивают наибольшую эффективную полную добротность  $Q_s$ .

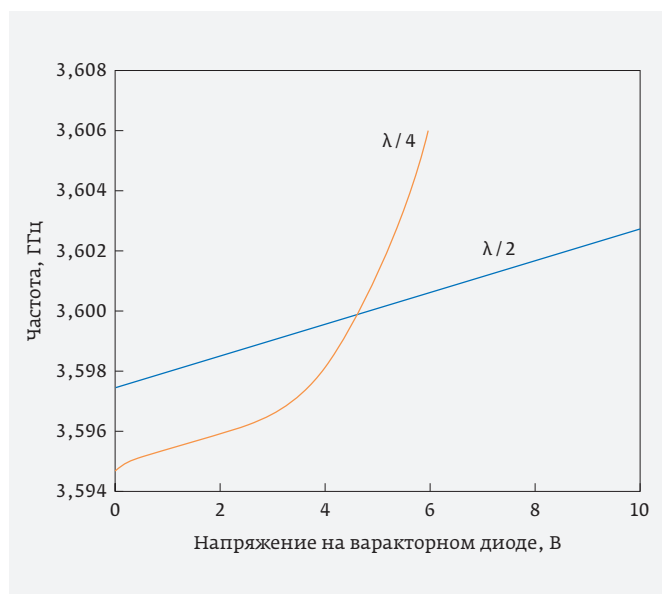
**Таблица 2.** Зависимости параметров ДР от положения настроечных дисков в колебательной системе, представленной на рис. 2

Тип настроечного диска	Относительное расстояние диска от стенки экрана	Резонансная частота низшего ( $TE_{10}$ ) вида колебаний, МГц	Эффективная добротность низшего ( $TE_{10}$ ) вида колебаний	Относительная отстройка первого паразитного колебания
Диэлектрический	0,0	10 221	9 370	1,267
	0,2	10 206	9 259	1,268
	0,4	10 157	9 164	1,270
	0,6	10 051	9 099	1,273
Металлический	0,0	10 249	9 116	1,267
	0,1	10 275	8 854	1,185
	0,2	10 308	8 571	1,060
	0,3	10 365	8 152	0,942



**Рис. 3.** Перестраиваемая варакторным диодом колебательная система с ДР

Реальные колебательные системы обязательно содержат как минимум элементы технологической подстройки частоты, а часто и элементы управления частотой. Перестройка частоты в генераторах на ДР может регулироваться с применением диэлектрических или металлических дисков (см. рис. 2). Их влияние на параметры ДР иллюстрирует табл. 2. Данные табл. 2 подтверждают известные положения [1], что диэлектрический элемент механического управления частотой ДР и, соответственно, частотой АГ меньше влияет на добротность  $Q_0$  ДР



**Рис. 4.** Зависимость резонансной частоты колебательной системы с ДР от напряжения на варакторном диоде:  $\lambda/4$  и  $\lambda/2$  – длины отрезков микрополосковой линии, подключенной к варакторному диоду

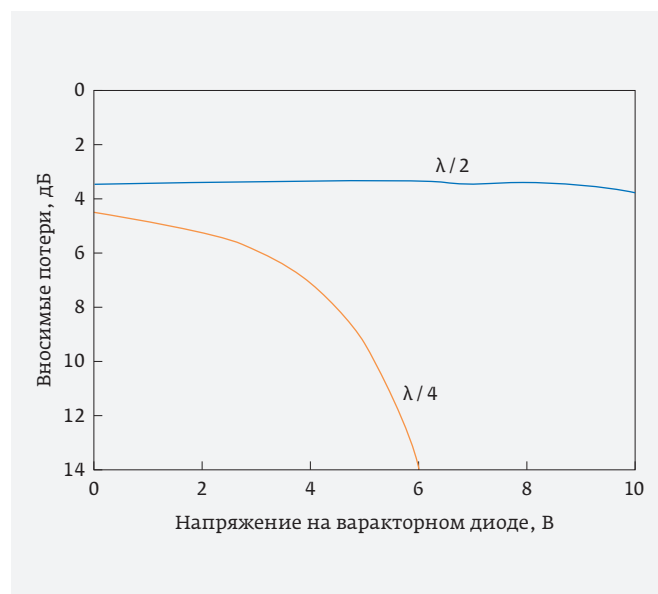
(а значит и колебательной системы в целом), чем металлический элемент.

Эффективность перестройки частоты с помощью этих дисков примерно одинакова, однако на паразитные частоты металлические диски влияют в большей степени.

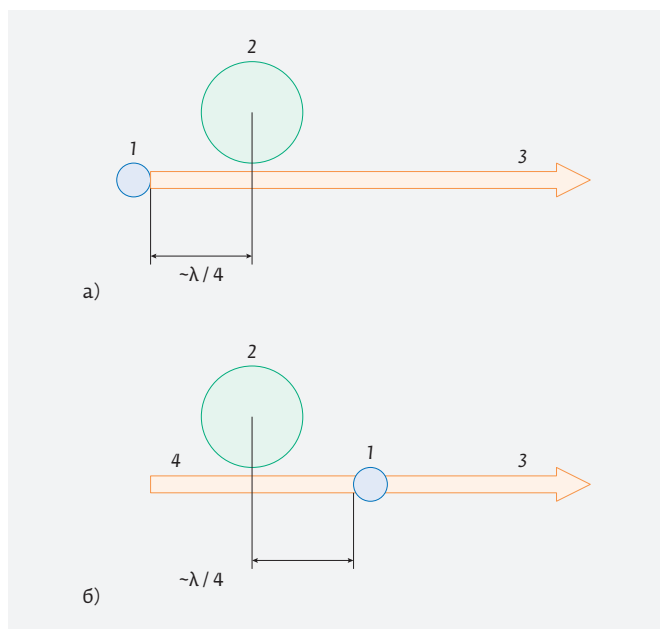
Наряду с механической перестройкой частоты ДР возможна электрическая (ее часто именуют электронной) перестройка частоты. При этом в качестве элементов перестройки применяют варикапы (или варакторные диоды (ВД)) (рис. 3). Типичный диапазон перестройки частоты ДР с применением ВД составляет единицы процентов (рис. 4) [7]. Однако при этом наблюдается значительное влияние перестройки на вносимые потери и, соответственно, эффективную добротность колебательной системы с ДР (рис. 5) [7] и, как следствие, уровень фазовых шумов генератора. Так, при варакторной перестройке частоты АГ ДР, которая обычно составляет 1–2%, фазовые шумы увеличиваются на 10–15 дБ при одинаковых отстройках от центральной частоты автогенератора в сравнении с АГ ДР с фиксированными или с механически перестраиваемыми частотами [6].

## КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОГЕНЕРАТОРОВ НА ДР

Колебательные системы определяются типом активного элемента. У автогенераторов на основе СВЧ-диодов колебательная система имеет простейшую топологию



**Рис. 5.** Зависимость вносимых потерь в колебательной системе с ДР от напряжения на варакторном диоде:  $\lambda/4$  и  $\lambda/2$  – длины отрезков микрополосковой линии, подключенной к варакторному диоду

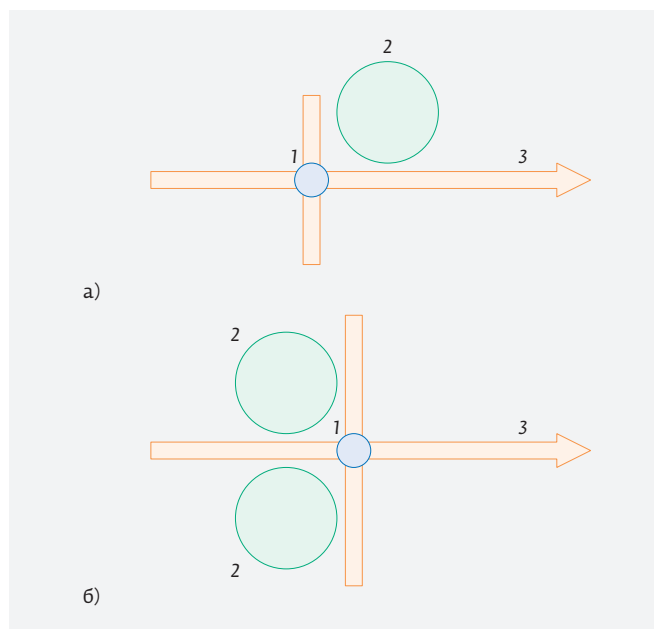


**Рис. 6.** Схематическое изображение топологий микрополосковых диодных автогенераторов с ДР 2: а – ДР в линии 3 вывода мощности, б – диодный генератор с реактивно отражающим резонатором 4

(рис. б), в которой ДР связан с линией отвода мощности или с дополнительной линией. Дополнительная линия на конце может быть нагруженной, либо разомкнутой. В последнем случае такую систему (рис. бб) называют колебательной с реактивно отражающим резонатором. В колебательных системах с реактивно отражающим резонатором требуется наименьшая связь ДР с отрезком линии и этим обеспечиваются минимальные вносимые потери в ДР и, соответственно, наибольшая эффективная добротность колебательной системы АГ. Недостатком схемы является большая вероятность возникновения паразитных частот генерации. Отмеченные колебательные системы образуют автогенераторы с последовательной обратной связью.

В случае транзисторного активного элемента, помимо указанных систем обратной связи, применяют схемы параллельной обратной связи. В них ДР образует полосно-пропускающий фильтр (ППФ), включенный между выводами транзистора (рис. 7). С точки зрения эффективной собственной добротности  $Q_3$ , колебательные системы с параллельной обратной связью уступают системам с последовательной обратной связью. Возможным приемом, повышающим эффективную добротность колебательной системы, является включение в схему двух электромагнитно связанных между собой ДР (рис. 7б).

Схема с параллельной обратной связью удобна для построения АГДР на основе активных элементов с высоким коэффициентом усиления, в качестве которых



**Рис. 7.** Схематическое изображение топологий микрополосковых транзисторных автогенераторов с колебательной системой на ДР 2: а – ДР в линии 3 вывода мощности, б – ППФ между базой и эмиттером

в последнее время применяют законченные усилительные чипы [8].

## АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ГЕНЕРАТОРОВ С ДР

Возможность расчета характеристик АГДР определяется двумя факторами. Во-первых, наличием и достоверностью математического (или схемного) представления активного элемента, а во-вторых, математическим описанием характеристик ДР. Известно большое число различных по сложности и достоверности математических моделей активных элементов, свойства которых описываются либо эквивалентными схемными представлениями, либо в терминах матриц рассеяния или волновых матриц. В любом случае для расчета характеристик АГ требуется математическое (схемное) описание его колебательной системы, в нашем случае – на основе ДР. Оценим известные модели ДР в СВЧ- и КВЧ-устройствах.

В любых устройствах ДР – объемный резонатор, электромагнитно связанный с линией передачи. Известен ряд эквивалентных схем представления объемного резонатора в устройствах, однако такой подход весьма условен и, как правило, ограничен применимостью в конкретных случаях (тех, для которых он предложен). Это свойственно и схемным представлениям ДР в устройствах. Кроме того, как показано еще в 1978 году, эквивалентное представление ДР в линиях (особенно в полых волноводах) требует учета нерезонансных возмущений (в схемном представлении – комбинации паразитных емкостных связей), что

соответствует следующему виду элементов матрицы рассеяния ДР в линии:

$$\begin{cases} S_{11} = S_{22} = \frac{1}{1 + i\omega k} \left[ -i\omega k + \frac{\beta'_0 \kappa(\omega)}{1 + \beta'_0 + \beta'_b} e^{-i\Psi} \right]; \\ S_{12} = S_{21} = \frac{1}{1 + i\omega k} \left[ 1 - \frac{\beta'_0 \kappa(\omega)}{1 + \beta'_0 + \beta'_b} e^{-i\Psi} \right], \end{cases}$$

где  $\kappa(\omega) = \left[ \frac{Q_0}{1 + \beta'_0 + \beta'_b} \left( \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2} + \frac{\beta''}{Q_0} \right) \right]^{-1}$  – коэффициент нерезонансного возмущения [9];  $\Psi$  – начальная фаза колебаний ДР;  $\beta'$  и  $\beta''$  – коэффициенты связи ДР с СВЧ-линией, определяемые выражениями:

$$\beta' = \beta'_0 + \beta'_b = \frac{P'_n}{P_T} \text{ и } \beta'' = \beta''_0 + \beta''_b = \frac{P''_n}{P_T}, P_T \text{ – мощность тепловых потерь, } P'_n \text{ и } P''_n \text{ – активная и реактивная составляющие мощности, излучаемой ДР в линию, при этом } \beta'_0 \text{ – коэффициент связи ДР с линией по распространяющимся видам волн, } \beta'_b \text{ – коэффициент связи ДР с линией по высшим (затухающим) видам волн (или ближним полям), возбуждаемым токами поляризации ДР, } \beta''_0 \text{ – частотный коэффициент по распространяющимся видам волн, } \beta''_b \text{ – частотный коэффициент по ближним полям.}$$

Из приведенных выражений следует, что ДР в СВЧ (и КВЧ) линиях полностью характеризуется интегральными параметрами, которые для целей инженерной практики могут быть рассчитаны даже аналитически [9]. С практической точки зрения для оценки характеристик АГ с ДР оказывается допустимым пренебречь емкостными связями в эквивалентной схеме включения ДР в линию и ограничиться, например для ДР в микрополосковой линии (МПЛ) (рис. 8), схемой, приведенной на рис. 9, с применением идеального трансформатора

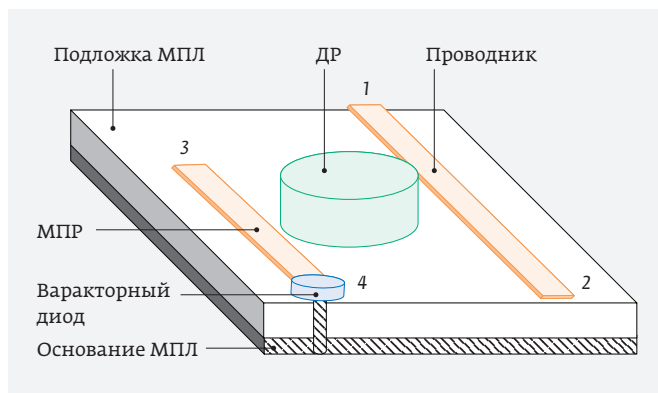


Рис. 8. Фрагмент СВЧ-цепи. 1-4 – концы проводников

(ИТ) [10]. В этой схеме сопротивление параллельной схемы замещения ДР определяется выражением:

$$Z_p = R_p \left[ 1 + jQ_p \left( \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{\omega\omega_p} \right) \right]^{-1},$$

где  $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}}$  – резонансная частота ДР;  $Q_p = R_p \sqrt{\frac{C_p}{L_p}}$  – собственная добротность ДР. Коэффициенты трансформации ИТ1 и ИТ2  $n_{1,2}^2 = \frac{2Z_b \beta_{1,2}}{R_p}$ , где  $Z_b$  – волновое со-

противление МПЛ;  $\beta_{1,2}$  – коэффициенты связи ДР с входной и выходной МПЛ соответственно.

Пример применения расчета характеристик ДР в СВЧ-цепях (линиях) иллюстрирует рис. 10 [10]. Тем не менее расчет характеристик АГДР удобнее проводить с использованием коэффициентов рассеяния четырехполюсника с ДР. Рассмотрим пример такого расчета АГДР с параллельной обратной связью на основе микросхемы СВЧ-усилителя (рис. 11) по схеме рис. 12 [11].

В схеме рис. 12 блоки 2–6 образуют колебательную систему генератора.

Расчет элементов топологии МПЛ АГ осуществляется с применением известных частотных характеристик элементов матрицы рассеяния усилителя и матрицы

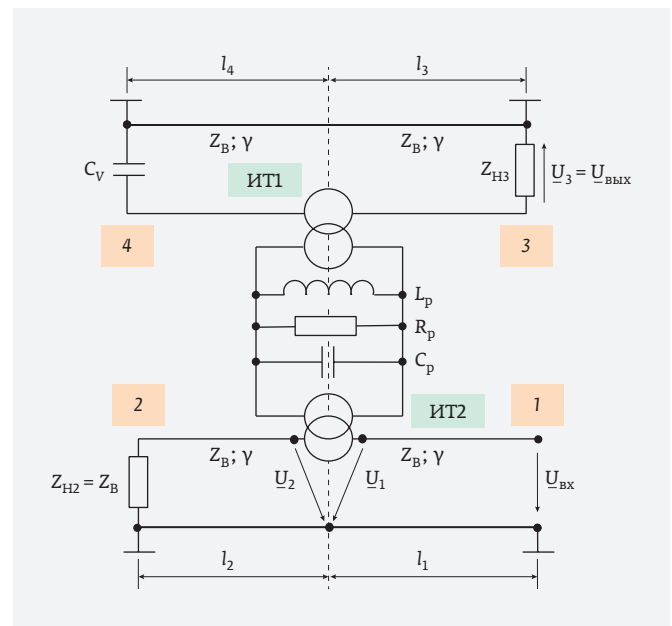
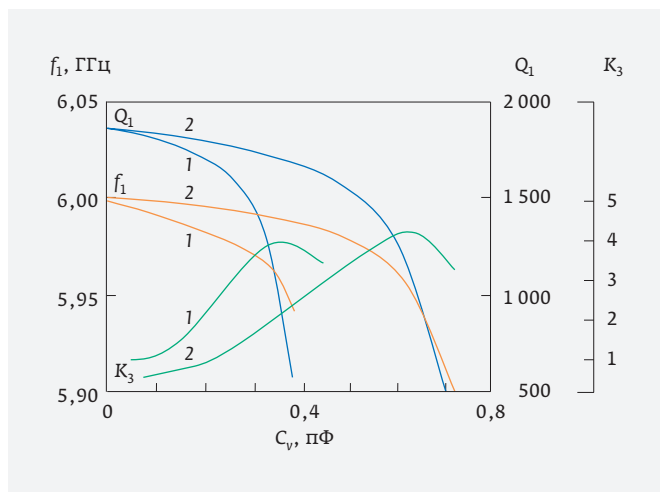


Рис. 9. Эквивалентная электрическая схема цепи.  $Z_{H2}, Z_{H3}$  – сопротивления нагрузок концов линий;  $Z_b$  – волновое сопротивление отрезков линий;  $\gamma$  – постоянная распространения волны в линии;  $l_1, l_2, l_3, l_4$  – отрезки линий;  $U_1, U_2, U_3$  – напряжения на элементах схемы



**Рис. 10.** Зависимости частоты связи, добротности и коэффициента передачи  $K_3$  по напряжению от емкости варакторного диода. 1 –  $l_4 = 0,2$  см; 2 –  $l_4 = 0,3$  см

рассеяния полосно-пропускающего фильтра на ДР, которая в приближении отсутствия паразитных емкостных связей имеет вид:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} a & (1-a) & -\sqrt{ab} & \sqrt{ab} \\ (1-a) & a & \sqrt{ab} & -\sqrt{ab} \\ -\sqrt{ab} & \sqrt{ab} & b & (1-b) \\ \sqrt{ab} & -\sqrt{ab} & (1-b) & b \end{bmatrix}$$

где  $a = S_{11} = \frac{\beta_1}{[(\beta_1 + \beta_2) + 1](1 + j\xi)} = S_{22}$ ;

$b = S_{33} = \frac{\beta_2}{[(\beta_1 + \beta_2) + 1](1 + j\xi)} = S_{44}$ ;

$\beta_1$  – коэффициент связи ДР с линией, соединяющей нагрузку и выход усилителя;

$\beta_2$  – коэффициент связи ДР с линией, образующей обратную связь со входом усилителя;

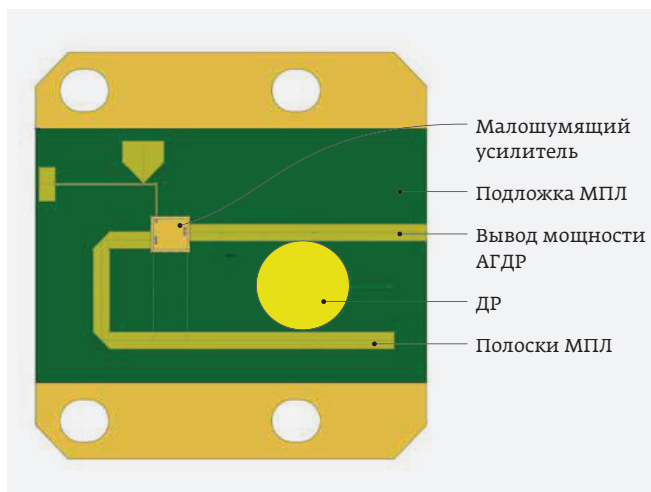
$\xi$  – относительная отстройка частоты.

В случае симметричного расположения ДР относительно микрополосковых линий:  $\beta = \beta_1 = \beta_2$ ; на резонансной частоте  $\xi = 0$ .

Потребовав обеспечения необходимой мощности на выходе, то есть указав величину  $b_2$ , и задавшись  $a_2$ , можно записать выражение баланса амплитуд и фаз АГ ДР в виде:

$$\mathcal{N}(e^{j\gamma x}, e^{j\gamma y}, e^{j\gamma z}, \beta) = 0, \quad (2)$$

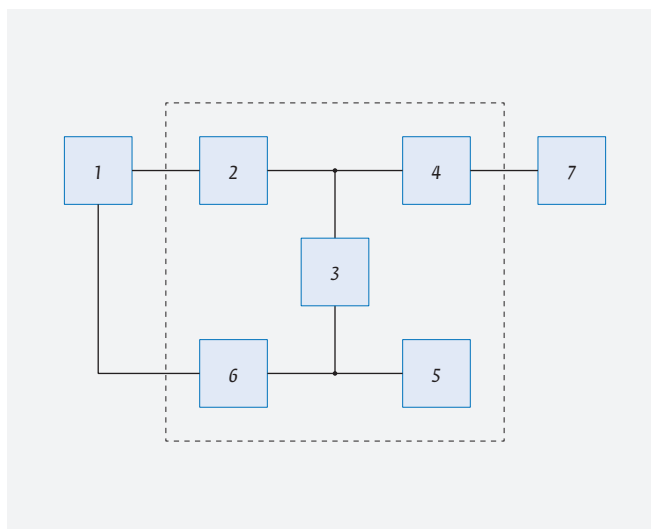
где  $\mathcal{N}$  – полиномиальная функция третьего порядка относительно  $\beta$ , коэффициенты которой зависят от S-параметров усилителя, постоянных распространения  $\gamma$  и длин отрезков  $x, y, z$  полосковых линий.



**Рис. 11.** АГ на микросборке малошумящего усилителя с параллельной обратной связью через полосно-пропускающий фильтр на ДР на основе микрополосковой линии (вид сверху)

Решение (2) может быть получено любым оптимизационным методом, например с помощью метода сканирования по значениям  $\gamma x, \gamma y, \gamma z$ .

При полученных значениях  $x, y$  и  $z$  необходимо выбрать расположение ДР относительно микрополосковых линий, обеспечивающее требуемое значение коэффициента  $\beta$ , а также рассчитать высоту ДР с резонансом на частоте генерации. Также необходимо оценить спектр собственных частот ДР и возможность перехода в режим генерации на частоте высших видов колебаний ДР. Как



**Рис. 12.** Структурная схема СВЧ-генератора: 1 – нелинейный усилительный элемент; 2, 6 – линии передачи сигнала; 3 – фильтр (ДР); 4 – согласующее устройство; 5 – эквивалентная нагрузка; 7 – полезная нагрузка

правило, используют низший вид колебаний ДР (в данном случае, вид колебаний  $H_{018}$ ).

Модель колебательной системы с ДР (рис. 13) [11] иллюстрирует пример целесообразного для создания генератора размещения ДР в МПЛ на диэлектрическом стержне (например, в виде кварцевого цилиндра), который закреплен на винте, что позволяет изменять связь ДР с микрополосковыми линиями. Одновременное с настройкой связи изменение частоты можно скомпенсировать с помощью настроечного винта, размещенного над ДР.

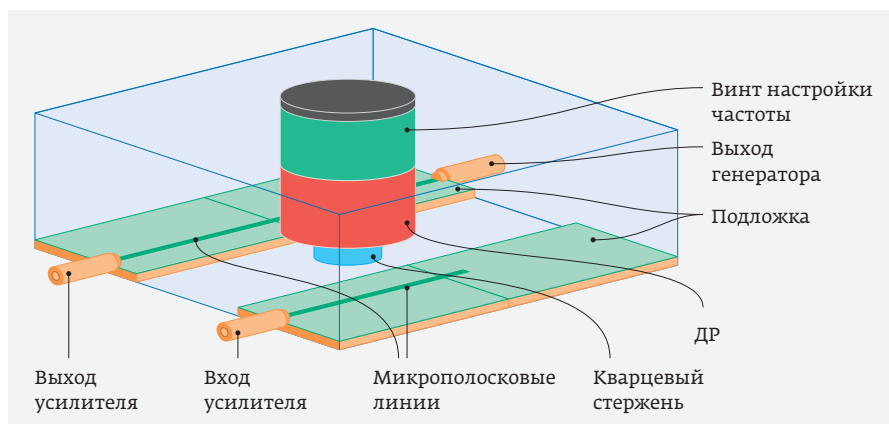


Рис. 13. Вид модели колебательной системы

## ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ

Электрические характеристики АГДР аналогичны тем, что есть у генераторов других типов, и включают:


- частотный диапазон:  $F_1 - F_2$ , ГГц;
- выходная мощность:  $P_{\text{вых}}$ , дБм;
- изменение выходной мощности в диапазоне температур:  $\Delta P_T$ , дБ;
- уровень  $n$ -й гармоники относительно  $P_{\text{вых}}$  на центральной частоте:  $P_n$ , дБс;
- уровень мощности интермодуляционных искажений относительно уровня мощности центральной частоты:  $P_{\text{имд}}$ , дБс;
- диапазон электрической перестройки частоты:  $\Delta P_e$ , МГц;
- диапазон механической перестройки частоты:  $\Delta P_m$ , МГц;
- зависимость частоты от напряжения питания:  $\Delta P_U$ , кГц/В;
- затягивание (изменение) частоты генерации трактом передачи мощности при КСВ в нем, например, 1,5:  $\Delta F_{\text{КСВ}}$ , МГц или %;

- зависимость относительной частоты генерации  $\partial f/f$  при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$ : ТКЧ,  $1/^\circ\text{C}$ ;
- спектральная плотность фазовых шумов при отстройке от центральной частоты:  $\sigma_f$ , дБс/Гц;
- напряжение питания:  $U_n$ , В;
- потребляемый ток:  $I$ , мА;
- потребляемая мощность:  $P_0$ , Вт;
- коэффициент полезного действия:  $\eta$ , %;
- тип соединителя вывода мощности.


Как правило, не все перечисленные параметры присутствуют в перечне характеристик конкретных генераторов, так как обычно отмечают лишь те из них, которые характеризуют особенности функционального назначения устройств.

## ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ АГДР

Характеристики современных АГДР отличаются от характеристик аналогов конца прошлого века по существу лишь по уровню фазовых шумов. Эти изменения соответствуют достигнутому за истекший период улучшению параметров компонентов автогенераторов, которые входят в формулу (1). Среди них определяющими оказываются уровень внутренних шумов активных



КРОКУСЭКСПО пав. 3 зал 15



РАЗРАБОТКА  
ПРОИЗВОДСТВО  
ИСПЫТАНИЯ  
ПОСТАВКА

Приглашаем вас 14–16 апреля на наш стенд № В7019

[www.radiocomp.ru](http://www.radiocomp.ru)

**ВЧ/СВЧ радиокомпоненты и устройства на их основе**

- новые разработки в области синтезаторов частот
- фильтры ВЧ/СВЧ, решения на их основе
- портативное измерительное оборудование, комплексы радиомониторинга
- анализаторы фазовых шумов
- аппаратура интеллектуального управления электропитанием














Рис. 14. Внешний вид транзисторного АГДР

элементов и добротность ДР. Это подтверждает сравнение комплекса характеристик автогенераторов трех типов (табл. 3) [12]: построенных на базе умножителей частоты колебаний кварцевых автогенераторов в сочетании с выходными усилительными каскадами; генераторов на диодах Ганна с волноводными колебательными системами и транзисторных АГДР. Приведенные сравнительные оценки (за исключением характеристик фазовых шумов) – достаточно условны, так как включают рекламную компоненту. Уровень фазовых шумов кварцевых генераторов с умножением частоты в области СВЧ-диапазона ухудшается примерно на 6 дБ с каждым удвоением частоты.

Заметим, что данные табл. 3, относящиеся к транзисторным АГДР, базируются на параметрах устройства фирмы Exodus Dynamics (рис. 14) [12], которые приведены в табл. 4 [10]. Они качественно не отличаются от характеристик устройств других производителей аналогичной

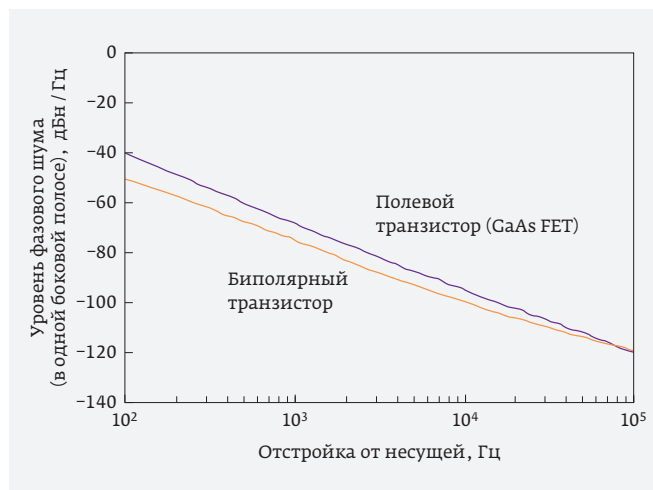


Рис. 15. Уровень фазовых шумов (характеризующий кратковременную стабильность частоты) АГДР на полевых и биполярных транзисторах

продукции и являются типичными для устройств такого типа. При этом достоинства транзисторных АГДР в сравнении с автогенераторами на диодах Ганна определяются не типом колебательной системы, а типом активного элемента. Это следует из факта примерной эквивалентности избирательных свойств волноводных и диэлектрических объемных резонаторов, а принципиальные достоинства последних в основном ограничены меньшими размерами и относительной простотой обеспечения высокой температурной стабильности резонансной частоты, а значит и температурной стабильности автогенератора в целом.

Таблица 3. Сравнение характеристик автогенераторов различных типов

Параметры	Тип генератора		
	С умножением частоты кварцевых АГ	Генераторы на диодах Ганна	Транзисторные АГДР
Надежность	Хорошая	Высокая	Исключительная
КПД	Низкий	Низкий	Высокий
Температурный диапазон	Хороший	Узкий	Исключительный
Чувствительность выходной мощности к вариации питания	Высокая	Высокая	Низкая
Уровень фазовых шумов	Очень хороший	Исключительный	Исключительный
Частотная стабильность	Исключительная	Хорошая	Очень хорошая
Стабильность при вариации параметров рабочей среды	Высокая	Высокая	Исключительная
Размеры	Большие	Средние	Малые



МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
**XIV НАВИГАЦИОННЫЙ  
ФОРУМ**



12-я международная  
выставка

# НАВИТЕХ

[www.navitech-expo.ru](http://www.navitech-expo.ru)

## 21–24 апреля 2020

ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»  
РОССИЯ, МОСКВА



Реклама 12+

Организатор форума:



Оператор форума:

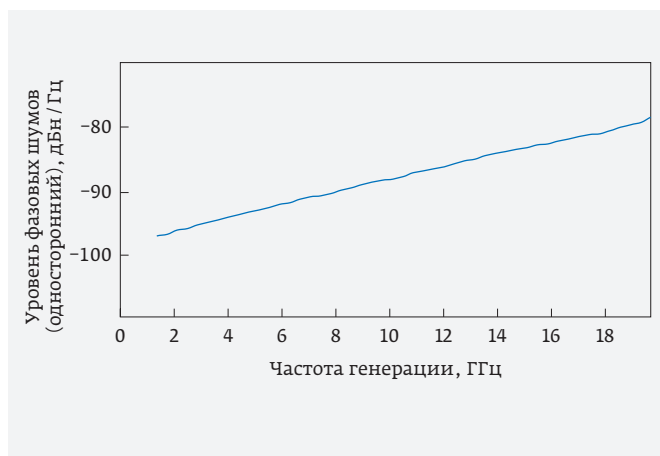


Стратегические партнеры форума:



Организатор выставки:

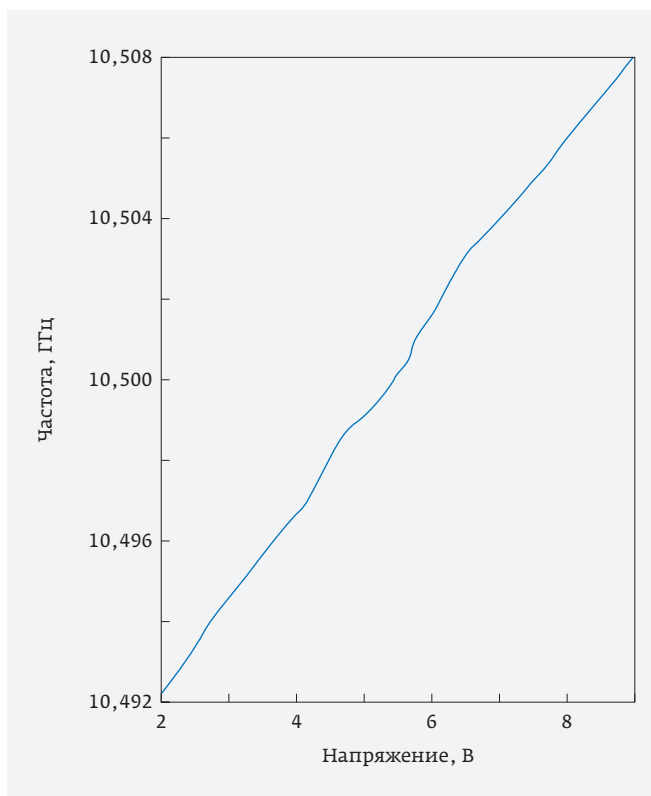




**Рис. 16.** Характер зависимости фазовых шумов АГДР при отстройке на 10 кГц от частоты генерации в диапазоне рабочих частот

Кратковременная стабильность частоты АГДР на полевых транзисторах уступает стабильности генераторов на биполярных транзисторах (рис. 15) [13] и совпадает со стабильностью генераторов на диодах Ганна.

Характер зависимости фазовых шумов АГДР в диапазоне рабочих частот (рис. 16) [13] определяется ростом собственных шумов активных элементов с увеличением частоты. Эта зависимость определяет переход на высоких



**Рис. 17.** Зависимость частоты колебаний АГ с ДР, перестраиваемого напряжением питания АЭ

**Таблица 4.** Параметры транзисторного АГДР модели EDRO-1000-XX.XX\* с коаксиальным выводом

Диапазон возможных частот генерации, ГГц	1-40
Механическая перестройка частоты, МГц	100 (на 10 ГГц)
Электрическая перестройка частоты, МГц	Опционально
Выходная мощность, дБм	13-25
Максимальный допустимый КСВН выходного тракта	2
Потребляемая мощность, Вт	От 0,1 до 1,5
Изменение выходной мощности при перестройке, дБм	±0,5
Изменение частоты при изменении напряжения питания ±1 В, МГц	$10^{-6}$
Затягивание частоты при КСВ = 1,65 в тракте вывода мощности, МГц	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$
Фазовый шум (отстройка от центральной частоты 10 кГц), дБ/Гц	-95 (на 10 ГГц)
Частотная стабильность, 1/°С	$5 \cdot 10^{-6}$
Мощность сигналов паразитных частот, дБн	-35
Мощность гармоник, дБн	-25
Диапазон рабочих температур, °С	0...70 (опционально -55...105)
Размеры, дюйм	2,25×0,92×0,67

\* XX.XX – частота в ГГц.

# РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

21–24  
апреля  
2020

Россия, Москва,  
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

**5G Big Data Умный город**  
Геоданные и навигационные технологии  
**Цифровое правительство ЦОДы**  
Информационная **IoT** Smart Device Show  
безопасность **Телеком**  
Искусственный интеллект **Спутниковая связь**  
**Умная мобильность** Российский софт  
**AR&VR Future TV**  
Дроны и беспилотные системы **Стартапы**



## СВЯЗЬ

32-я международная выставка  
«Информационные  
и коммуникационные технологии»

[www.sviaz-expo.ru](http://www.sviaz-expo.ru)



## НАВИТЕХ

12-я международная выставка  
«Навигационные системы,  
технологии и услуги»

[www.navitech-expo.ru](http://www.navitech-expo.ru)



Минкомсвязь  
России



Федеральное агентство связи  
(РОССВЯЗЬ)



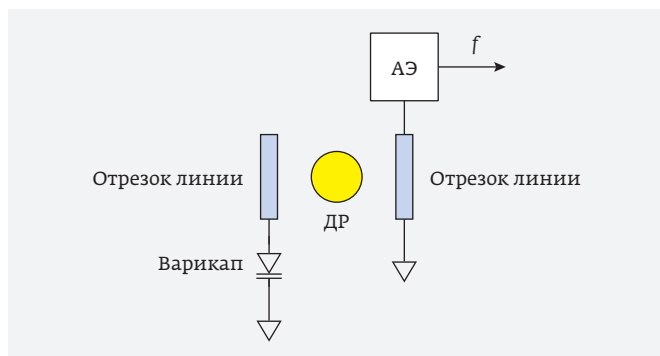
НП «ГЛОНАСС»  
Федеральный сетевой оператор



[www.hi-techweek.ru](http://www.hi-techweek.ru)

Реклама 12+

ЭКСПОЦЕНТР

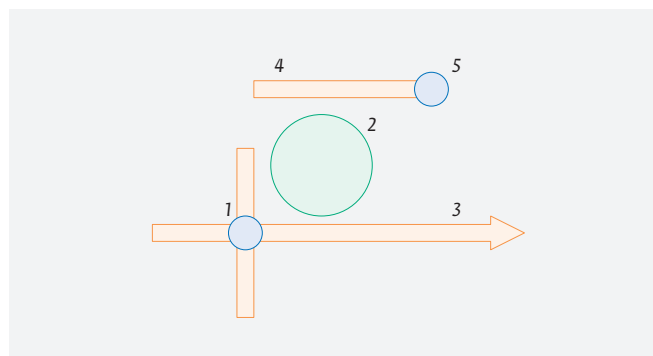


**Рис. 18.** Вариант генератора, управляемого напряжением, работающего в диапазоне частот от 0,5 до 40 ГГц, с колебательной системой на ДР

частотах от биполярных к полевым активным структурам (табл. 5) [14].

Улучшение параметров кратковременной и долговременной стабильности частоты АГДР возможно с применением фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [15] – системы автоматического регулирования, которая подстраивает частоту генератора, управляемого напряжением (ГУН), так, чтобы она была пропорциональна частоте опорного сигнала. Регулировка осуществляется благодаря наличию отрицательной обратной связи. Кроме того, ГУН с ДР применяют и просто для подстройки или перестройки частоты.

Автогенераторы с ДР, управляемые напряжением, построены на колебательных системах, содержащих ДР, перестраиваемые по частоте, как правило, варакторным диодом. Интерес к созданию таких устройств определяется:



**Рис. 19.** Схематическое изображение топологии микрополоскового транзисторного автогенератора с колебательной системой на ДР, перестраиваемого варакторным диодом: 1 – транзистор; 2 – ДР; 3 – линия вывода мощности; 4 – отрезок микрополосковой линии для управления частотой колебательной системы; 5 – варакторный диод

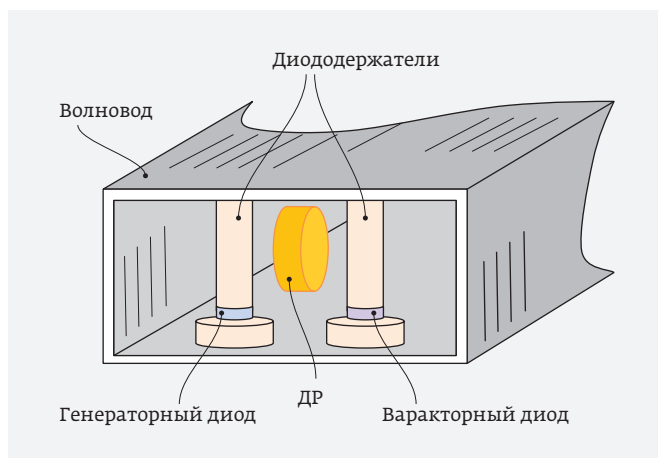
1) возможностью создания АГДР с частотной (или фазовой) модуляцией генерируемых сигналов; 2) возможностью электрической подстройки частоты генерации; 3) применением ГУН в качестве компонента в устройствах с фазовой автоподстройкой частоты.

Простейший ГУН основан на управлении частотой колебаний изменением напряжения питания активного элемента, влияющего на его частотные свойства (рис. 17). Этот принцип построения ГУН малоприменим для создания АГ, так как сопровождается изменением выходной мощности при реализации ощутимых перестроек. Поэтому для управления частотой АГ чаще

Таблица 5. Зависимости параметров АГДР от типа транзистора

Тип транзистора	Технология	Частота, ГГц	$P_{\text{вых}}$ , мВт	КПД, %	Фазовые шумы*, дБн/Гц
GaAs MESFET Затвор 0,25×120 мкм	Монолитная	23	16	7	-100
Si/SiGe HBT Эмиттер 1×20 мкм	Гибридная	23,2	7	11,4	-92
GaIn/GaAs HBT Эмиттер 1,5×20 мкм	Гибридная	21	3	13	-102
InGaAs/GaAs НЕМТ Затвор 0,25×120 мкм	Монолитная	35,5	12	7	-97
InGaAs/GaAs НЕМТ Затвор 0,25×120 мкм	Монолитная	62,1	1,7	2	-78
InGaAs/GaAs НЕМТ Затвор 0,25×120 мкм	Гибридная	81,9	1	1,5	-67

\* Спектральная плотность фазовых шумов, дБн/Гц при отстройке на 100 кГц от несущей.



**Рис. 20.** Схематичный вид волноводного диодного АГДР с варакторной перестройкой частоты

применяют перестройку резонансной частоты колебательной системы с помощью элемента, управляемого напряжением. В качестве элемента управления частотой колебательной системы чаще всего применяется управляемая емкость – варикап (или варактор). Если в случае колебательной системы на основе сосредоточенных элементов (индуктивности и емкости) включение ВД в контур очевидно, то в колебательной системе с ДР связь между ВД и ДР осуществляется через элемент связи распределенного типа. Чаще всего связь обеспечивают через связанный с ДР отрезок полосковой или микрополосковой линии. Примеры такой связи иллюстрируют рис. 3 и 18.

Увеличение диапазона перестройки частоты колебательной системы (см. рис. 4) требует увеличения связи ВД с ДР, что сопровождается ростом вносимых потерь (см. рис. 5), а значит и уменьшением эффективной добротности ДР. Практика создания колебательных систем с ДР, перестраиваемых варакторным диодом [5], показывает, что реализация нескольких процентов перестройки резонансной частоты колебательной системы с ДР сопровождается снижением эффективной добротности системы до значений 100–200, соответствующих «добротности» варакторных диодов. Это ухудшает шумовые характеристики автогенераторов с такой колебательной системой, приближая значения спектральных шумов устройства к шумам автогенераторов с колебательной системой без ДР. Заметим, что сами колебательные системы с варакторными диодами в отсутствие ДР имеют на порядок большую полосу перестройки. ГУН с малым диапазоном электрической перестройки частоты находят применение, например, в устройствах фазовой подстройки частоты [16].

Типичные параметры таких генераторов в частотных диапазонах X и K: диапазон линейной перестройки

частоты – порядка 1–1,5%; крутизна перестройки частоты – более 1 МГц/В.

Исходя из ограниченного диапазона рациональной перестройки резонансной частоты колебательной системы с ДР в пределах 1–1,5%, применение ГУН с ДР эффективно лишь при узкополосном диапазоне вариации несущей частоты АГ или же в генераторах фиксированных частот с ФАПЧ.

В наиболее распространенном варианте микрополосковых конструкций АГДР элемент связи выполняется в виде отрезка микрополосковой линии, или микрополоскового резонатора (МПР) (рис. 19). Волноводные транзисторные АГДР с электрической перестройкой частоты образуются сочетанием микрополосковых структур с микрополосково-волноводными адаптерами. Стандартный адаптер образует штырь в Е-плоскости сечения прямоугольного волновода, соединенный с центральным проводником линии.

Диодные АГДР с варакторной перестройкой частоты в микрополосковом исполнении не отличаются от транзисторных (аналог рис. 18 с заменой АЭ на генераторный диод), а в волноводном варианте (рис. 20) не требуют отдельных элементов связи, кроме диододержателей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **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 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, производитель. 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-Affifi, Widad Ismail.** High Tuning Sensitivity Dielectric Resonator Oscillator From Optimization of Dielectric Resonator TE<sub>016</sub> 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. Т. 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 МКЭЭЭ-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](http://www.luffresearch.com/Phase-Locked_Oscillators.html)
16. DRO Application Note D-104: Phase-Locked DRO Characteristics. – Интернет-ресурс <http://micro.apitech.com/>

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



### МОЩНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СВЧ-УСИЛИТЕЛИ

Сечи Ф., Буджатти М.

При поддержке АО «НПП „Исток“ им. Шокина»

Перевод с англ. под ред. д. т. н. А. А. Борисова

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 416 с., ISBN 978-5-94836-415-5

Цена 975 руб.

В книге рассмотрены все традиционные вопросы, связанные с разработкой усилителей мощности, начиная от получения моделей приборов на большом сигнале и заканчивая обсуждением сумматоров мощности и методов проектирования.

Большое внимание в издании уделено рассмотрению физических основ приборов, фазовых шумов, схем смещения и тепловому проектированию. Также в книге особое внимание уделяется рассмотрению фундаментальных принципов. Издание затрагивает необычайно большое количество областей, связанных с физикой полупроводников и активных устройств.

Книга представляет интерес для специалистов, которые занимаются разработкой усилителей мощности для базовых станций сотовой связи. В особенности это относится к рассмотрению моделей на больших сигналах, проблем, связанных с фазовыми шумами, методов проектирования усилителей мощности, специальных конструкций усилителей мощности и теплового проектирования. Также данная книга может послужить в качестве справочного пособия при углубленном изучении СВЧ-устройств.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)