

# КОМПОНЕНТЫ СИНТЕЗАТОРОВ СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

## ГЕНЕРАТОРЫ, УПРАВЛЯЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЕМ

Л. БЕЛОВ  
belov@atom.ru

В любом радиотехническом и электронном устройстве необходим источник опорных колебаний со стабильной частотой. Поскольку невозможно построить такой генератор на любую заданную частоту, используют синтезаторы стабильных частот (СЧ) – устройства преобразования частоты колебаний из одного значения в другое с малым шагом перестройки и низкими погрешностями. Схемы построения СЧ, в зависимости от конкретных технических требований, различны, однако в каждой из них используют набор типовых электронных компонентов: управляемые по частоте генераторы, умножители и делители частоты, смесители, частотные фильтры, элементы цифровой техники. Номенклатура этих электронных компонентов чрезвычайно разнообразна, так что их правильный выбор – задача достаточно сложная.

Помочь разработчикам в столь непростом выборе призван цикл статей, намеченных к публикации в нашем журнале. Особое внимание в них будет уделено выявлению основных технически значимых параметров электронных компонентов радиочастотных схем, сформулированы рекомендации по их выбору для генераторов стабильной частоты.

В первой предлагаемой статье рассмотрены важнейшие характеристики генераторов, управляемых по частоте напряжением (ГУН). Последующие публикации будут посвящены другим узлам СЧ: смесителям, преобразователям частоты, широкополосным умножителям и делителям частоты, частотным фильтрам.

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГУН

Генератор, управляемый по частоте напряжением (Voltage Controlled Oscillator – VCO), представляет собой автоколебательную аналоговую схему (рис. 1), которая питается от источника напряжения  $E_0$ , снабжена цепью управления частотой напряжением  $E_y$  и формирует на внешней нагрузке  $R_n$  напряжение  $u(t)$ . Форма вы-

ходного напряжения ГУН близка к гармонической и описывается выражением  $u(t) = U_0[1 + \mu(t)] \sin[2\pi f_r t + \varepsilon(t)]$ , где  $U_0$  – амплитуда;  $f_r$  – частота;  $\mu(t)$  – относительные изменения амплитуды ( $|\mu(t)| \ll 1$ );  $\varepsilon(t)$  – отклонения фазы от равномерного во времени закона,  $|\varepsilon(t)| \ll 2\pi$ . Как правило, активный элемент автогенератора ГУН – транзистор с колебательной системой на LC-элементах, которая создает положительную обратную связь, компенсирующую потери и обеспечивающую генерацию на частоте  $f_r$ .

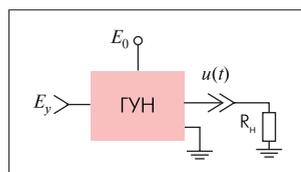


Рис. 1. Схема соединения ГУН с внешними электрическими цепями

В твердотельных ГУН миллиметрового диапазона (рис. 2) в качестве активного элемента используется полупроводниковая структура на GaAs с отрицательным сопротивлением. Элементы  $L$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  и варикап  $VD_1$  образуют колебательную систему;  $Dr_1$ ,  $Dr_2$  и  $Dr_3$  – блокировочные дроссели;  $C_{бн1}$ ,  $C_{бн2}$ ,  $C_{бн3}$ ,  $C_{бн4}$  – блокировочные конденсаторы;  $R_1$  и  $R_2$  – цепь формирования отпирающего напряжения транзистора;  $R_3$  – резистор ограничения рабочего тока транзистора  $VT_1$ . В СВЧ-диапазоне колебательная система и блокировочные элементы выполняются в виде микрополосковых линий или иных цепей с распределенными параметрами. Эквивалентная емкость  $C_{3_{эKB}}$  варикапа  $VD_1$  зависит от управляющего напряжения  $E_y$  на входе управления. Для улучшения характеристик ГУН вместо одиночного варикапа применяют варикапные матрицы (встречно включенные варикапные пары).

В диапазоне ниже 20 МГц в качестве ГУН приемлемы функциональные генераторы – ИС на основе операционных усилителей с электронным управлением перестройкой частоты в 10–100 раз за

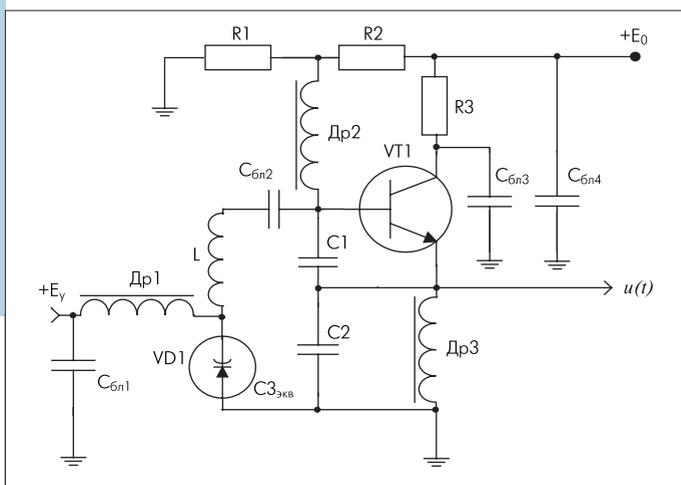


Рис. 2. Пример принципиальной схемы ГУН



счет изменения тока заряда RC-цепи. Однако по стабильности частоты такие ГУН существенно уступают LC-генераторам, а их более высокочастотная реализация проблематична.

Без учета влияния инерционности транзистора и фазового сдвига в цепи обратной связи автогенератора частота генерации  $f_r$  определяется реактивными элементами колебательной системы:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

где  $1/C = 1/C1 + 1/C2 + 1/C3_{\text{экв}}(E_y)$ .

Амплитуда  $U_0$  установившихся выходных колебаний зависит от режима транзистора, параметров колебательной системы и сопротивления нагрузки. При повышении управляющего напряжения  $E_y$  эквивалентная емкость варикапа  $C3_{\text{экв}}(E_y)$  уменьшается, емкость  $C$  падает, а частота генерации  $f_r$  растет. При этом из-за изменения потерь в колебательной системе может происходить паразитное изменение амплитуды (мощности) генерации. Паразитное влияние на частоту и амплитуду генерации оказывают также вариации питающего напряжения  $E_0$ , температуры окружающей среды, модуля и фазы сопротивления нагрузки.

Диапазон перестройки частоты и линейность зависимости частоты от напряжения смещения на варикапе в значительной степени определяются его вольт-фарадной характеристикой с учетом паразитных емкостей схемы. Для ГУН, перестраиваемых в широкой полосе частот, разрабатывают специальные варакторные диоды со сверхрезким  $p\text{-}n$ -переходом, которые позволяют изменять емкость  $C$  более чем в четыре раза, а частоту, следовательно, — более чем в два раза. В таких ГУН оптимизируют номиналы колебательной системы и блокировочных элементов, дроссели заменяют резисторами, исключая паразитные резонансы, используются балансные схемы активных элементов, снижающие влияние вариаций нагрузки и температуры окружающей среды на частоту и уровень фазового шума. Чтобы упростить схему управления частотой и уменьшить эффект изменения нагрузки, иногда собственно ГУН дополняют буферным усилителем и широкополосным удвоителем частоты.

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГУН

Основные технические характеристики и параметры ГУН, которые надо учитывать при создании электронной аппаратуры на их основе, можно разделить на три группы: характеристики качества сигнала, характеристики управления частотой и параметры чувствительности к внешним воздействиям.

*Качество выходного сигнала ГУН характеризуют:*

- выходная мощность (power output)  $P_{\text{вых}}$ . Определяется как мощность на номинальной согласованной нагрузке ( $R_H = 50 \text{ Ом}$ ) в середине рабочего интервала управляющего напряжения при номинальной температуре окружающей среды ( $+25^\circ\text{C}$ ). Величина  $P_{\text{вых}}$  измеряется, применительно к СЧ, в децибелах относительно мощности 1 мВт:  $P_{\text{вых}}[\text{дБмВт}] = 10\lg(P_{\text{вых}}[\text{мВт}]/1 \text{ мВт})$ . В англоязычной литературе используют обозначение  $1 \text{ dBm} = 1 \text{ дБмВт}$ ;
- диапазон частот (frequency range)  $f_{\text{вых}}$  измеряется в мегагерцах и определяется как максимальная частота, на которую может быть настроен ГУН путем изменения управляющего напряжения;
- спектральная плотность мощности (СПМ) фазового шума (phase noise)  $S_f(F)$ , где  $F = |f - f_r|$  — отстройка от несущей частоты (carrier offset). Величину  $S_f(F)$  измеряют анализатором фазы (например, типа Agilent 4352S), включающим опорный генератор с прецизионной фазовой стабильностью. В таком анализаторе выделяется фазовое расхождение  $\varepsilon(t)$  сигнала ГУН от опорного

колебания анализатора на заданной частоте  $f_r$  и вычисляется спектр мощности, то есть Фурье-образ  $\varepsilon(t)$  в зависимости от частоты отстройки  $F$ . Зависимость  $S_f(F)$  приводится как односторонняя (Single Side Band – SSB) спектральная плотность мощности, т.е. величина, на 3 дБ меньшая, чем суммарная мощность фазового шума при положительных и отрицательных отстройках, которая появляется на выходе фазового дискриминатора в анализаторе фазовых нестабильностей. Величина  $S_f(F)$  измеряется в децибелах среднего квадрата фазовых отклонений от опорного колебания по отношению к  $1 \text{ рад}^2$  в полосе 1 Гц для каждого значения частоты отстройки [дБ/Гц]. В англоязычной литературе используется размерность [дБс/Гц]. Графики  $S_f(F)$  строятся в логарифмическом масштабе по двум осям (Bode diagram). Величина  $S_f(F)$  падает по мере увеличения  $F$ , достигая минимального уровня "белого фазового шума"  $S_{f_{\text{бел}}}$  при отстройках порядка полосы пропускания колебательной системы автогенератора. Для простоты вместо графика  $S_f(F)$  уровень фазового шума характеризуют значениями СПМ для нескольких значений отстройки, например 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц и т.д. По характеристике  $S_f(F)$  можно определить СПМ частотных отклонений от номинальной частоты  $S_f(F) = F^2 S_f(F)$ , которая измеряется в единицах квадрата отклонения частоты ( $\text{Гц}^2$ ) на единицу полосы отстроек [ $\text{Гц}^2/\text{Гц}$ ]. Величина  $S_f(F)$  также уменьшается с увеличением отстройки, достигая уровня "белого частотного шума"  $S_{f_{\text{бел}}}$  характерного для каждой модели ГУН. Оценочная кратковременная нестабильность частоты (residual FM) определяется интегральным среднеквадратичным паразитным отклонением

$$\Delta f_{\text{ср}} = \sqrt{2 \int_{F_H}^{F_B} S_f(F) dF}, \text{ где } F_H \text{ и } F_B - \text{ граничные частоты. По умолчанию}$$

принимают  $F_H = 50 \text{ Гц}$ ,  $F_B = 3 \text{ кГц}$ . Относительная нестабильность частоты  $\Delta f_{\text{ср}}/f_r$  для LC-генераторов радиочастотного диапазона составляет величину  $10^{-5}$ – $10^{-7}$ . При измерении шумовых характеристик в качестве источников напряжений  $E_0$  и  $E_y$  используют аккумуляторные батареи, чтобы снизить влияние СПМ шума источника питания на уровень фазового шума ГУН;

- подавление высших гармоник (harmonic suppression). Уровень синусоидальности выходного сигнала ГУН характеризуется мощностью второй  $A_2$ , третьей  $A_3$ , иногда четвертой  $A_4$  гармоник в спектре выходного сигнала по отношению к мощности несущего колебания и измеряется в децибелах [дБ] или [дБс];
- значения питающего напряжения  $E_0$  [В] и потребляемого тока  $I_0$  [мА];
- продолжительность процесса включения и выключения  $\tau_{\text{вкл}}$ . Для ГУН, работающих в импульсном режиме, эта величина изме-

рывается как отрезок времени, в течение которого после подключения питающего напряжения выходная мощность ГУН достигает 0,9 от номинального значения.

К характеристикам управления частотой относятся:

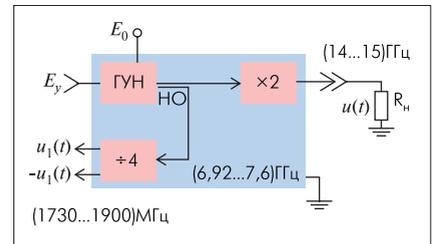
- модуляционная характеристика (frequency tuning characteristic) – зависимость частоты генерации от квазистатического изменения управляющего напряжения  $f_f(E_y)$ . Для простоты вместо кривой  $f_f(E_y)$  указывают наименьшее  $f_{\min}$  и наибольшее  $f_{\max}$  значения частоты при электронной перестройке, пределы допустимых значений управляющего напряжения  $E_{y\min}$  и  $E_{y\max}$ , а также характеризуют линейность модуляционной характеристики (tuning linearity), например, указывая пределы изменения крутизны управления частотой (tuning sensitivity)  $S_y = (\Delta f_f / \Delta E_y)$  [МГц/В] по диапазону перестройки управляющего напряжения. Относительную полосу перестройки  $BW = (f_{\max} - f_{\min}) / f_{cp}$ , где  $f_{cp} = (f_{\max} + f_{\min}) / 2$  – середина полосы, измеряют в процентах. Для ГУН с широкой полосой перестройки удобнее использовать коэффициент перекрытия по частоте  $k_f = f_{\max} / f_{\min}$ . Например, для октавного ГУН  $k_f = 2$ ;
- изменение выходной мощности (output power variation) в диапазоне управляющих напряжений  $P_{\text{вых}}(E_y)$ . В качестве численных параметров вместо кривой  $P_{\text{вых}}(E_y)$  для простоты указывают в [дБмВт] наибольшую и наименьшую мощности выходного сигнала в допустимом интервале изменения управляющего напряжения при номинальных нагрузке и температуре;
- полоса пропускания по цепи управления  $F_{\text{мод}}$  (tuning bandwidth). Эта величина является мерой инерционности вариаций частоты по отношению к быстрым изменениям управляющего напряжения. Она определяется как частота (в кГц) гармонического напряжения на входе управления ГУН, при которой девиация частоты выходного сигнала уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с девиацией при медленном (квазистатическом) изменении  $E_y$  в тех же пределах;
- ток в цепи управления частотой  $I_y$ . Варикап в качестве управляющего частотой элемента обычно заперт, поэтому постоянная составляющая тока управления  $I_y$  в середине интервала изменения  $E_y$  ничтожна – менее 10 мкА. Но ток через варикап может существенно возрасти при близких к нулю управляющих напряжениях из-за открывания рп-перехода высокочастотным напряжением, что приводит к падению выходной мощности ГУН. Наибольшее значение  $E_y$  ограничено открыванием рп-перехода варикапа высокочастотным напряжением в области пробоя. Отметим, что амплитуда высокочастотного напряжения на варикапе может заметно превышать напряжение источника питания. Чувствительность к влиянию внешних факторов характеризуют:
- вариации частоты при изменении питающего напряжения  $E_0$  (frequency pushing)  $S_0 = \Delta f_f / \Delta E_0$  [МГц/В] при номинальных температуре и нагрузке;

- температурный коэффициент изменения частоты  $TKЧ = \Delta f_f / \Delta T$ , измеряемый в [МГц/°C] при номинальной температуре +25°C. Кроме того, указываются уходы частоты от номинального значения для предельно допустимых значений температуры окружающей среды, например -55°C и +85°C;
- изменения частоты  $\Delta f_{p-p}$  при вариациях фазы коэффициента отражения от нагрузки (frequency pulling). Величина  $\Delta f_{p-p}$  определяется как разность между максимальным и минимальным значениями (peak-peak) частоты [МГц p-p] для всех значений фазы коэффициента отражения от 0 до 180° при подключенном непосредственно к выходу ГУН согласованному аттенуатору на 6 дБ или при фиксированном коэффициенте стоячей волны = 2.

**НОМЕНКЛАТУРА ГУН**

В мире свыше 35 фирм выпускают более 3500 моделей ГУН (табл. 1, 2). Выходная мощность ГУН обычно варьируется в пределах от -5 дБмВт до +16 дБмВт. Как правило, пониженный уровень  $P_{\text{вых}}$  относится к моделям, в которых встроены выходной буферный каскад, ослабляющий влияние нестабильной фазы нагрузки. С другой стороны, ГУН шведской фирмы Sivers IMA (см. табл.1) имеют выходную мощность до +28 дБмВт в диапазоне миллиметровых волн.

ГУН на основе LC-генераторов предназначены для диапазона частот от 5 МГц до 26 ГГц. В интегральных схемах (ИС) ГУН миллиметрового диапазона длин волн иногда включают широкополосный буферный умножитель частоты на 2 или на 4, который играет роль развязывающего каскада для ослабления влияния нагрузки, а пониженная частота автогенератора облегчает построение колебательной системы с управлением частотой на варикапе. Именно так построена ИС НМС398QS16G (рис.3). Кроме того, она содержит направленный ответвитель (НО) и широкополосный предварительный делитель частоты (prescaler) на 4 с дополнительными выходами когерентных противофазных колебаний дециметрового диапазона, что облегчает организацию системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для стабилизации дискретной сетки частот.



**Рис.3. Структурная схема ГУН миллиметрового диапазона НМС398QS16G**

Относительная ширина полосы перестройки частоты современных ГУН лежит в пределах от 1–10 % до октавы и более. Ее ограничивают такие факторы, как предел изменения емкости варикапа, недопустимые изменения выходной мощности, нелинейность модуляционной характеристики. Среди ГУН с октавным интервалом перестройки ( $k_f = 2$ ) можно выделить ИС POS-500W для диапазона 0,5 ГГц и M3500-0613 для диапазона 1,3 ГГц. Фирма Micronetics также разработала ИС MW500-1414 специально для сверхширокополосных систем диапазона 4 ГГц с  $k_f = 2,3$  при выходной мощности (+11±0,75) дБмВт. Электронную перест-

ройки ( $k_f = 2$ ) можно выделить ИС POS-500W для диапазона 0,5 ГГц и M3500-0613 для диапазона 1,3 ГГц. Фирма Micronetics также разработала ИС MW500-1414 специально для сверхширокополосных систем диапазона 4 ГГц с  $k_f = 2,3$  при выходной мощности (+11±0,75) дБмВт. Электронную перест-

**Таблица 1. Основные фирмы-производители ГУН (в порядке расширения коэффициента перекрытия диапазона частот)**

Фирма	Число моделей ГУН	Диапазон частот, МГц	Диапазон мощностей, дБмВт	Интервал рабочих температур, °C		Интернет-адрес
				Минимальный	Максимальный	
Hittite Microwave	13	2000...15000	-8...+10	-	-40...+85	www.hittite.com
Sivers IMA	10	3000...26500	+14...+28	0...+60	-40...+85	www.siversima.se
Micronetics Wireless	203	60...6500	-12...+12	0...+70	-40...+85	www.mwireless.com
Synergy Microwave	143	40...6100	0...+15	-	-30...+70	www.synergymwave.com
Z-Communication	422	40...6500	-7...+13	0...+70	-55...+85	www.zcomm.com
Amplifonix	45	25...5000	+2...+10	-	-55...+85	www.amplifonix.com
Mini-Circuits	128	12...3000	0...+13	-	-55...+85	www.minicircuits.com
Magnum Microwave	73	25...18000	-2...+12	0...+85	-55...+100	www.remecmagnum
Universal Microwave	383	10...8100	0...+12	-	-40...+70	www.vco1.com
Modco	1196	5...10000	-1...+20	-	-40...+85	www.modcoinc.com



Таблица 2. Технические параметры некоторых ГУН (в порядке увеличения наивысшей рабочей частоты)

Модель, фирма	Частота $f_r$ , МГц	$P_{\text{вых}}$ , дБмВт	$E_{\text{ш}}$ , В	$S_{\text{ш}}$ , МГц/В	Фазовый шум, дБ/Гц при отстройке		$\Delta f_{1,85}$ , МГц	$S_{\text{ф}}$ , МГц р-р	$S_0$ , МГц/В	$A_2$ , дБ	$F_{\text{мод}}$ , МГц	Питание	
					1 кГц	100 кГц						$E_0$ , В	$I_0$ , мА
JTOS-25, Mini-Circuits	12,5...25	+8	1...11	1...4	-95	-135	0,3	0,03	0,02	-26	0,13	12	20
POS-50P, Mini-Circuits	24...29	+10	0...5	2...2,5	-92	-134	0,4	0,06	0,04	-18	0,05	12	20
ROS-150, Mini-Circuits	75...150	+9,5	1...18	4...6,8	-80	-127	6	0,8	0,3	-23	0,1	12	20
POSA-138, Mini-Circuits	118...138	+5	1...16	2,3	-100	-145	0,9	0,07	0,03	-40	2	12	25
M500-1343, Micronetics	128...160	+10,5	0...13	3	-100	-132	1,2	7	3	-20	23	12	50
JCOS-175LN, Mini-Circuits	125...175	+3,7	1...17	3,5	-95	-138	0,4	0,08	0,05	-24	2	10	25
JTOS-300P, Mini-Circuits	148...174	+10	0...5	7...10	-82	-122	2	1	0,2	-27	0,1	12	20
POS-500W, Mini-Circuits	250...500	+10	1...16	17...23	-79	-120	3	1,5	0,2	-25	0,1	12	25
JCOS-820WLN, Mini-Circuits	780...860	+9	1...20	8	-90	-132	3	4,5	0,3	-13	2	9	25
ZOS-1025, Mini-Circuits	685...1025	+8	1...16	30	-	-112	-	0,05	30	-25	0,1	12	140
POSA-960, Mini-Circuits	800...960	+16	1...16	10...30	-84	-130	3,5	2	18	-30	2	15	50
M3500-0613, Micronetics	650...1300	+8,5	0...20	20...60	-69	-112	2	15	1,5	11	17,6	12	22
JCOS-1100LN, Mini-Circuits	1070...1115	+8,5	1...20	4,5	-88	-130	3	7,5	0,5	-24	6	8	25
POS-1605PV, Mini-Circuits	1500...1605	0	0,5...5	40...50	-74	-118	24	6	0,8	-17	8	3,3	16
MAX2753, Maxim	2400...2500	-8	0...3	150	-	-98	25	-	-	-26	-	5	8,6
VC0191-2750U, Sirenza	2700...2750	-3	0,8...2,4	50...80	-	-113	-	5	1	-15	-	3	7
M500-1414, Micronetics	1700...3900	+10	0,5...13	150	-	-107	-	12	5	-14	12	6,5	35
MW500-1262, Micronetics	4900...6500	+2,5	1...22	100	-	-108	20	10	10	-15	-	12	50
HMC398QS16G, Hittite	14000...15000	+6	1...10	30...80	-75	-110	35	4	30	-12	-	5	20
VO3262K/00, Siivers IMA	20000...24000	+28	6...15	100...600	-	-72	60	1	0,6	-30	13	15	300

ройку частоты с  $k_f = 1,7$  в 4-см диапазоне допускают и микросхемы VO3262C/00 с повышенной мощностью в нагрузке.

Шумовые свойства ГУН различного диапазона можно сопоставить следующим образом. Допустим, надо определить, что с точки зрения шумов более предпочтительно в радиосистеме с несущей частотой  $f_r = 1100$  МГц и зоной отстроек на  $F = 1$  МГц: ГУН JCOS-1100LN или ИС POSA-138 с выходной частотой 137,5 МГц и последовательным маломощным умножителем частоты на 8. Шумовые характеристики некоторых ГУН представлены на рис. 4. Из графика видно, что при одинаковых отстройках (125 кГц)  $S_{\text{ф}}(F)$  для POSA-138 на 13 дБ лучше, чем для JCOS-1100LN. Однако при требуемой отстройке 1 МГц применение JCOS-1100LN обеспечивает  $S_{\text{ф}}(1 \text{ МГц}) = -150$  дБ/Гц (точка А на рис.4). В то же время, при умножении несущей частоты после POSA-138 на  $N = 8$  отношение уровня фазовых нестабильностей к несущей не изменится и останется таким же, как и при отстройках на 125 кГц. На выходе умножителя шум  $S_{\text{ф}}(1 \text{ МГц})$  будет равен шуму ГУН POSA-138  $S_{\text{ф}}(125 \text{ кГц}) = -146$  дБ/Гц (точки В и Б на рис.4, соответственно) без учета дополнительного шума при умножении. Таким образом, JCOS-1100LN по уровню шума предпочтительнее POSA-138 на 4–6 дБ.

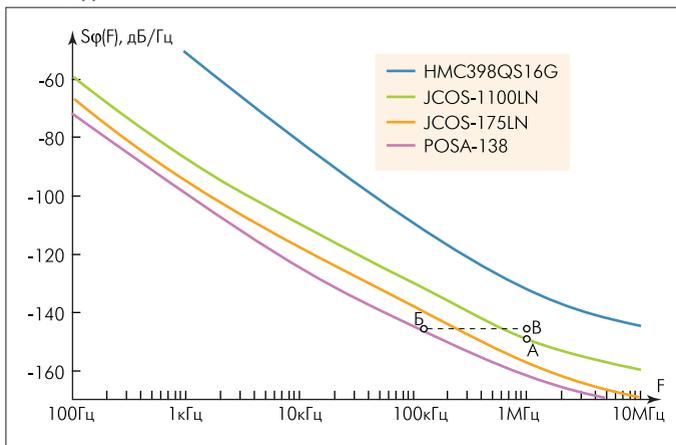


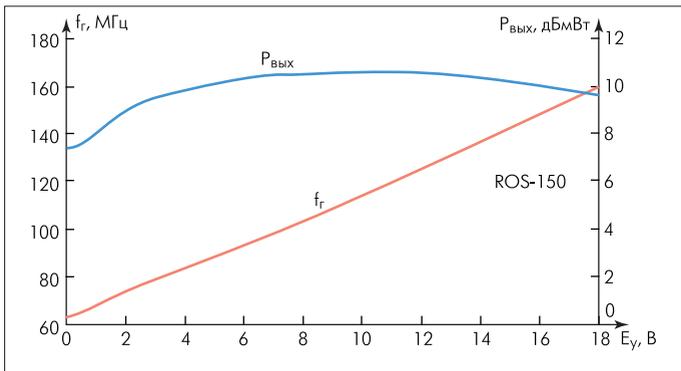
Рис.4. Шумовые характеристики ГУН

Типовые значения  $S_{\text{ф бел}}$  составляют -120...-130 дБ/Гц для рабочих частот менее 500 МГц и -95...-102 дБ/Гц для ГУН с выходной частотой 2–3 ГГц. Среди маломощных ГУН можно выделить MW500-1343 (Micronetics) с уровнем шума -147 дБ/Гц на частоте  $f_r = 150$  МГц при отстройке  $F = 100$  кГц и -100 дБ/Гц при отстройке  $F = 1$  кГц и JTOS-25 (Mini-circuits), величина СПМ фазового шума которого составляет -115 дБ/Гц при отстройке  $F = 10$  кГц. Для указанных ИС зона белого частотного шума соответствует отстройкам  $F = 10\text{--}20$  кГц, а уровень  $S_{\text{ф бел}}$  существенно зависит от шумовых свойств источников напряжений  $E_0$  и  $E_{\gamma}$ .

Содержание высших гармоник в выходном сигнале ГУН зависит от вида колебательной системы, режима активного элемента автогенератора и от рабочей точки варикапа. Уровень второй гармоники  $A_2$  изменяется в пределах от -7 дБ (HMC385LP4) до -35 дБ (JTOS-100) или -40 дБ (POSA-138). Для снижения уровня высших гармоник в выходную цепь некоторых ГУН встраивают фильтры нижних частот, подавляющие вторую и высшие гармоники. В результате этого в MW500-1343 уровень второй гармоники не более -20 дБ, а третьей менее -40 дБ; в VO3262K/00 благодаря такому фильтру  $A_2 = -30$  дБ. Нужно отметить, что при использовании встроенных умножителей и делителей частоты в спектре выходного колебания появляются дополнительные дискретные комбинационные компоненты на полупериодной и на полупериодной частотах (у HMC398QS16G их уровень - -20 дБ и -30 дБ, соответственно).

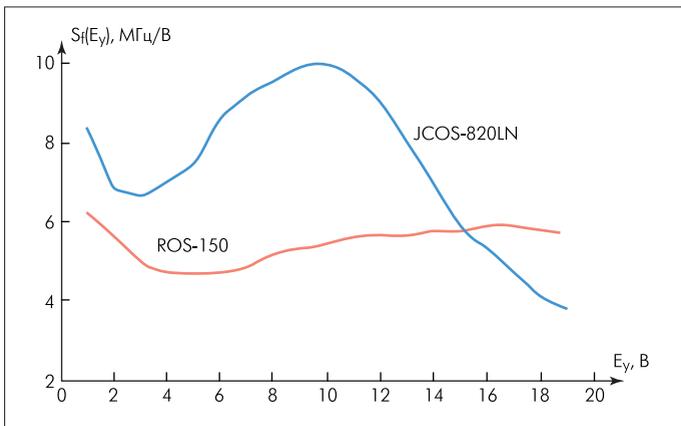
Питающие напряжения ГУН для большинства изделий составляют 3 В (POS-1605PV; VC0191-2750U), 5 или 12 В. Ток потребления обычно не превышает 20–30 мА. В ряде ГУН встроен буферный усилитель для увеличения развязки от вариаций нагрузки (например, ZOS-1025). В таких изделиях потребляемый ток достигает 140 мА. ГУН повышенной выходной мощности (VO3262K/00) потребляют до 300 мА. Для некоторых моделей ГУН нормируется время установления и спада мощности после коммутации питания: для MAX2753  $\tau_{\text{вкл}} = 10$  мкс,  $\tau_{\text{выкл}} = 8$  мкс.

Модуляционные характеристики ГУН монотонны и, как правило, достаточно линейны (рис.5). Для выбора рабочей точки по управляющему напряжению с точки зрения линейности модуляции удобно использовать зависимость  $S_{\gamma}(E_{\gamma})$ . На рис.6 видно, что у генератора



**Рис.5. Модуляционные характеристики октавного ГУН ROS-150.** Сплошной линией показана зависимость  $f_r(E_y)$ , пунктиром – соответствующая  $P_{\text{вых}}(E_y)$

JCOS-820WLN, оптимизированного разработчиком как малошумящий, крутизна модуляционной характеристики изменяется в заметных пределах 3,8–10 МГц/В. В ГУН ROS-150 приняты меры по линеаризации модуляционной характеристики, поэтому ее крутизна изменяется от 4,9 до 6,2 МГц/В.



**Рис.6. Зависимость модуляционной чувствительности ГУН от управляющего напряжения**

У ГУН интервалы значений управляющего напряжения  $E_y$  могут быть различны. В качестве нижней границы  $E_y$  большинство производителей указывают 0,5 или 1 В. Дело в том, что при  $E_y$ , близком к нулю, *pn*-переход варикапа открывается положительной полуволной высокочастотного напряжения и через него начинает течь прямой ток. Поэтому значение  $E_y = 0$  обычно безопасно, но не соответ-

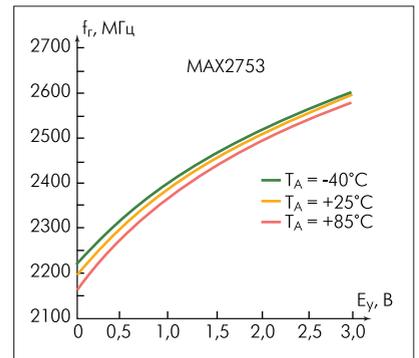
ствует номинальному режиму. Однако есть модели, в которых  $E_y = 0$  входит в рекомендуемые пределы (M3500-0613, ROS-900PV). Некоторые ИС ГУН разработаны для схем с напряжением управления не более 3 В (VCO191-2750U), не более 5 В (JTOS-300P) и свыше 20 В (MW500-1262). Можно выделить микросхему MAX2753, у которой при низковольтной цепи управления высокая крутизна модуляционной характеристики  $S_y > 150$  МГц/В.

Полоса модулирующих частот в большинстве изделий не опускается ниже  $F_{\text{мод}} = 100$  кГц. Но для низкочастотных ГУН, например POS-50P, она снижается до 50 кГц. Поскольку данный параметр ограничен только номиналами блокировочных цепей, то можно выбрать ГУН с заметно более широкой полосой по цепи управления. Так, в M3500-0613 полоса модулирующих частот достигает 17,6 МГц.

Коэффициент чувствительности частоты к вариациям температуры окружающей среды изменяется в пределах от 20 МГц/°C для M3500-0613 диапазона 6 ГГц до 0,02 МГц/°C для MW500-1343 диапазона 160 МГц. Для ROS-900PV повышение температуры от 25° до 85°C приводит к снижению частоты на 5 МГц (0,6%) и мощности на 0,6 дБ, понижение же температуры до -55°C увеличивает частоту на 5 МГц, а мощность на 0,4 дБ. Типичная чувствительность ГУН к изменению температуры в широких пределах показана на рис.7.

Если в ГУН встроены буферные широкополосные усилители или удвоители частоты, чувствительность к фазе коэффициента отражения уменьшается. Например, при ослаблении на 6 дБ в ИС MW500-1343  $\Delta f_{\text{р-р}}$  снижается до 0,13 МГц на частоте 160 МГц, в ГУН HMC398QS16G – до 4 МГц на частоте 15 ГГц. Встроенный буферный усилитель позволяет в некоторых моделях (VO3262C/00) иметь два взаимно развязанных выхода для подключения нагрузки.

В заключение отметим, что данные об основных мировых производителях ГУН, а также массу иной полезной информации, например таблицу соответствия единиц измерения мощности [Вт] и [дБмВт], можно найти на сайте [www.radiocomp.ru](http://www.radiocomp.ru).



**Рис.7. Изменения частоты в широком температурном интервале для MAX2753**

### Сигнальный процессор на частоту 1 ГГц. Освоение 90-нм технологии

Фирма Texas Instruments в январе этого года объявила о поставке опытных образцов сигнальных процессоров (DSP) на тактовую частоту 1 ГГц. Процессоры TMS320C6414T, C6415T и C6416T могут выполнять  $8 \cdot 10^9$  операций умножения с накоплением над восьмиразрядными данными при обработке видеосигналов и изображения или  $4 \cdot 10^9$  операций над 16-разрядными данными при обработке речевых и аудиосигналов. Так, один 1-ГГц чип сможет обрабатывать данные восьми каналов видеосистемы MPEG-2-формата, обеспечивая в реальном времени разрешение 720x480 пикселей. Такое быстроедействие открывает новые области применения DSP – от адаптивных антенных решеток до систем технического зрения. Все микросхемы серии имеют 1 Мбит встроенной памяти, а также интегрированные в чип периферийные устройства.

Высокое быстроедействие достигнуто за счет инновационной методологии проектирования микросхемы и перехода к 90-нм технологии. Благодаря увеличению числа чипов на пластине на ~50% были снижены и издержки производства микросхем. В результате, применив новую технологию при изготовлении выпущенного в 2000 году DSP типа TMS320C64x на частоту 720 МГц, фирме удалось снизить его стоимость более чем в два раза.

Новые DSP совместимы с процессорами предыдущих поколений. Так, они могут работать с тем же программным обеспечением, что и процессоры серии C64x, выполненные по 90-нм технологии. Они также совместимы с ними по расположению выводов.

Texas Instruments уже начала отгрузку опытных микросхем на 1 ГГц. Массовое их производство должно начаться в четвертом квартале 2004 года. Начальная цена C6414T при закупке партии в 10 тыс. шт. составит 189 долл.

[www.ti.com](http://www.ti.com)