

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 .

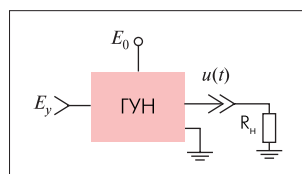


Рис. 1. Схема соединения ГУН с внешними электрическими цепями

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

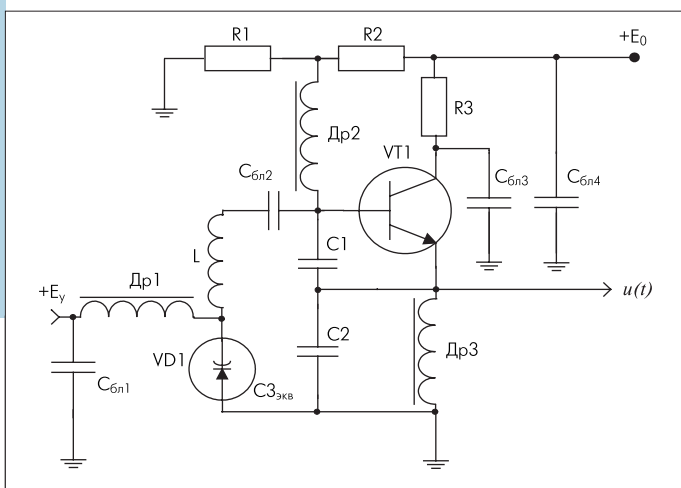


Рис. 2. Пример принципиальной схемы ГУН



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-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 ($R_H = 50$ Ом) в середине рабочего интервала управляющего напряжения при номинальной температуре окружающей среды (+25°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 dBm = 1 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 рад² в полосе 1 Гц для каждого значения частоты отстройки [дБ/Гц]. В англоязычной литературе используется размерность [dBc/Hz]. 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 (Гц²) на единицу полосы отстроек [Гц²/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

$$\Delta f_{\text{ср}} = \sqrt{2 \int_{F_H}^{F_B} S_f(F) dF},$$

где F_H и F_B — граничные частоты. По умолчанию принимают $F_H = 50$ Гц, $F_B = 3$ 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 [dBc];
- значения питающего напряжения E_0 [В] и потребляемого тока I_0 [mA];
- 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 Δf_{p-p} при вариациях фазы коэффициента отражения от нагрузки (frequency pulling). Величина Δf_{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 HMC398QS16G (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.

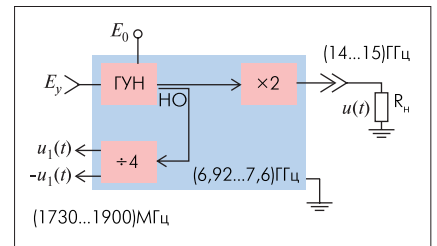


Рис.3. Структурная схема ГУН миллиметрового диапазона HMC398QS16G

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 перестройку (к $k_f = 2$) можно вы-

делить 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 перестройку (к $k_f = 2$) можно вы-

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.

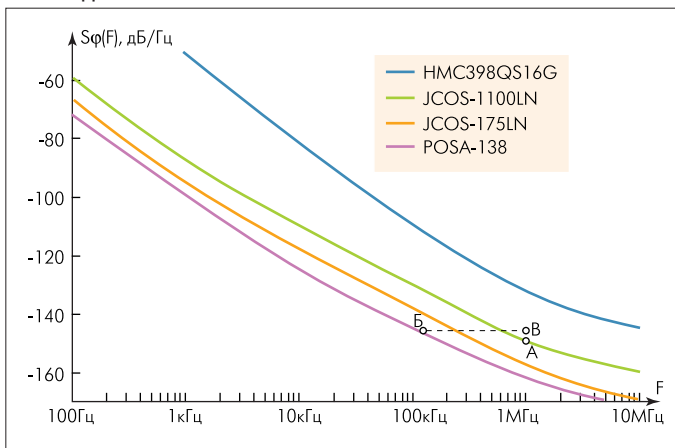


Рис.4. Шумовые характеристики ГУН

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 $E_{\text{г}}$.

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 $S_{\text{г}}(E_{\text{г}})$. На рис.6 видно, что у генератора

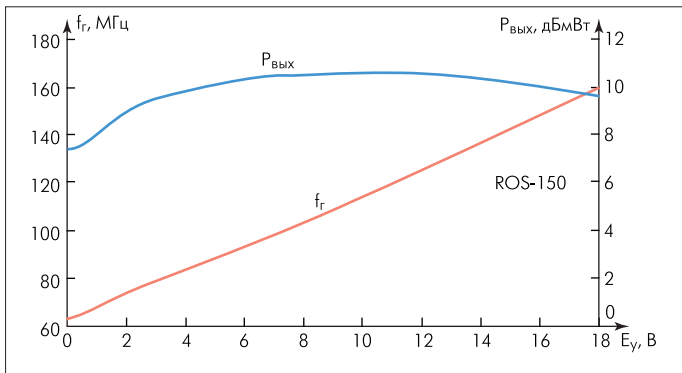


Рис.5. Модуляционные характеристики октавного ГУН ROS-150. Сплошной линией показана зависимость $f_r(E_y)$, пунктиром – соответствующая $P_{\text{вых}}(E_y)$

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.

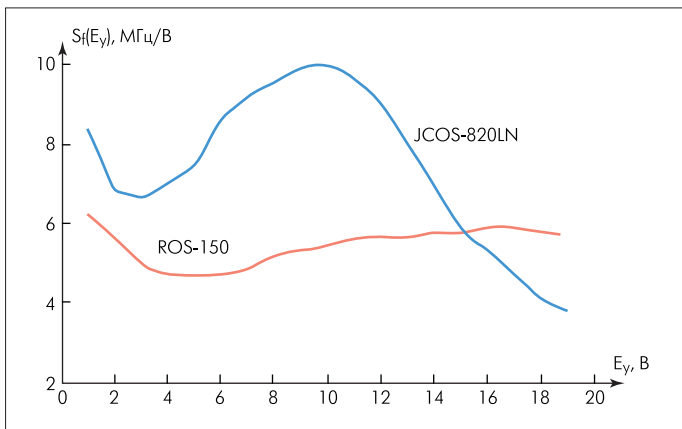


Рис.6. Зависимость модуляционной чувствительности ГУН от управляющего напряжения

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 Δf_{p-p} 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.

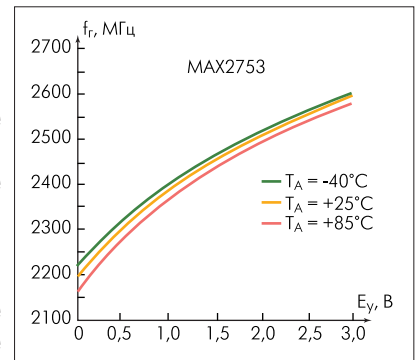


Рис.7. Изменения частоты в широком температурном интервале для MAX2753

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