

# ОПОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ\*



Л.Белов

Для исправного функционирования любого электронного оборудования необходим источник периодических колебаний с достаточно малой нестабильностью частоты. Его назначение – синхронизация процессов, модуляция сигналов по закону передаваемого сообщения или с целью выделения полезной информации. Такие источники существенно различаются по средней частоте, уровню сигнала и по относительной нестабильности частоты, которая может изменяться на много порядков – от  $10^{-3}$  до  $10^{-12}$  и более. Рассмотрим представленные на рынке разнообразные модели источников колебаний, используемые в электронных устройствах в качестве опорных генераторов или возбуждателей.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Установившиеся периодические колебания автономных генераторов  $u(t)$  характеризуются средней частотой, формой колебания на протяжении его периода и флуктуациями текущей фазы. Стабильность частоты таких генераторов оценивается сравнением их сигналов с колебаниями вторичных стандартов частоты. Почти гармоническое колебание опорного автогенератора можно записать в виде  $u(t) = U_0 [1 + \mu(t)] \sin[2\pi f_0 t + \varepsilon(t) + \varphi_0]$ , где  $U_0$  и  $f_0$  – амплитуда и несущая частота опорного сигнала,  $\mu(t)$  и  $\varepsilon(t)$  – его амплитудная и фазовая нестабильности,  $\varphi_0$  – начальная фаза. Поскольку генератор автономен, значение  $\varphi_0$  – не определено. Непосредственно после включения питающего напряжения автогенератора в переменные  $\mu(t)$  и  $\varepsilon(t)$  входят регулярные составляющие, определяющие **длительность установления амплитуды и выбег частоты** при прогреве. В установившемся тепловом режиме процессы, вызывающие амплитудную и фазовую нестабильности, – случайные. При длительной работе возможен **дрейф средней частоты**, связанной со старением стабилизирующего резонатора или деградацией вакуума в колбах с атомными частицами вторичного стандарта.

Для проведения метрологически достоверных измерений стабильность эталонного источника колебаний должна быть на один-два порядка выше, чем у оцениваемого источника. Поэтому при описании характеристик наиболее стабильных **вторичных стандартов частоты** необходимо указывать измерительное средство или методику измерений. Для вторичных стандартов частоты указывают **погрешность воспроизведения** частоты за определенное время наблюдения  $T$  при повторных включениях. Относительное среднеквадратическое отклонение (СКО) от частоты стандарта

характеризует **погрешность установки частоты**  $d_{уст}$ . Значение СКО определяет число старших десятичных разрядов номинала частоты, которые являются достоверными в отличие от младших разрядов, иногда приводимых производителями генераторов и измерительных приборов как результат вычисления частоты без учета доверительной погрешности. Для генераторов с невысокой стабильностью значение погрешности измеряется в сотых долях (процентах). При средней стабильности указывают миллионные доли – пропромилле, или млн<sup>-1</sup> (parts per million – ppm), при высокой стабильности – биллионные (миллиардные) (parts per billion – ppb).

## Ведущие производители генераторных изделий

Наименование	Адрес сайта
Atlantic Microwave Ltd.	www.atlanticmicrowave.co.uk
C-MAC Frequency Products	www.cmac.com/mt/
Communication Techniques, Inc.	www.cti-inc.com
Connor - Winfield	www.conwin.com
CTS Corporation	www.ctscorp.com
FOX Electronics	www.foxonline.com
Frequency Electronics, Inc.	www.frequelec.com
General Microwave Corp	www.gmcwave.com
Magnum Microwave Corp.	www.magnummicrowave.com
Mercury Electronic Ind.	www.mercury-crystal.com
MF Electronics Corp.	www.mfelec.com
Micro Lambda Wireless, Inc.	www.micro-lambda.com
Microwave Dynamics	www.microwave-dynamics.com
MITEQ	www.miteq.com
MTI-Milliren Technologies, Inc.	www.mti-milliren.com
M-tron Industries, Inc.	www.mtron.com
Murata Manufacturing Co. Ltd.	www.murata.com
Narda Microwave	www.nardamicrowave.com
Poseidon Scientific Instruments	www.psi.com.au
Princeton Microwave Technology, Inc.	www.pmmt.net
Q-Tech	www.q-tech.com
Quartzlock	www.quartzlock.com
QuinStar Technology, Inc.	www.quinstar.com
Raditek International	www.raditek.com
Synergy Microwave Corp.	www.synergymwave.com
Spacek Labs, Inc.	www.spaceklabs.com
Stanford Research Systems	www.srsys.com
Symmetricom	www.symmetricom.com
Techtrol Cyclonetics, Inc.	www.tci-ant.com
Tekelec Temex	www.tekelec-temex.com
Temex Microsonics	www.temex-tmx.com
Micro Networks (Andersen Laboratories)	www.micronetworks.com
United Monolithic Semiconductors	www.ums-gaas.com
Vectron Laboratories, Inc.	www.vectron.com
Научно-исследовательский приборостроительный институт, Н.Новгород	www.kwarz.ru
Российский институт радионавигации и времени, С.-Петербург	www.rirt.ru

\* Публикация продолжает серию статей по обзору характеристик радиокомпонентов мировых производителей [1, 2].



Характер фазовых и амплитудных нестабильностей определяет спектральную плотность мощности (СПМ) периодических колебаний  $u(t)$  на единичном сопротивлении, сосредоточенную вблизи частоты  $f_0$ , –  $S_m(f) = 2 \int [u(t)]^2 \cos 2\pi f t dt$ . Но более корректная характеристика колебаний автогенератора – это СПМ его **фазовой нестабильности**  $S_\varphi(F)$ , где  $F = |f - f_0|$  – отстройка от номинальной частоты. Фазовая нестабильность однозначно определяет нестабильность циклической частоты колебаний  $\Delta f(t) = (1/2\pi) d\epsilon(t)/dt$ , а СПМ нестабильности фазы связана с **СПМ частотных отклонений** соотношением  $S_f(F) = F^2 S_\varphi(F)$ .

В течение короткого времени возможны изменения фазы, обусловленные эффектом **дрожания** (jitter). Этот эффект вызван пульсациями питающего напряжения, внешними акустическими воздействиями (микрофонный эффект) или фликкер-эффектами в элементах генератора. Дрожание оценивают по значению СКО моментов перехода фазы через нуль и измеряют в пикосекундах.

При расчете параметров конкретного радиоэлектронного средства надо знать  $S_\varphi(F)$  его возбудителя с учетом вклада узлов синтеза частот и обработки сигнала. Общую оценку уровня нестабильности частоты опорного генератора удобнее представлять в виде СКО частоты за определенный отрезок времени. **Кратковременную нестабильность частоты**  $\delta_k(T)$  определяет относительное СКО частоты за время  $T$  длительностью 1, 10, 100 или 1000 с. Этот параметр определяет вклад в частотный шум таких естественных процессов, как дробовой и тепловой шум элементов задающего автогенератора. **Долговременная нестабильность** (дрейф) **частоты**  $\delta_d(T)$  за время  $T$  длительностью в сутки, неделю, месяц, год, 10 или более лет характеризует эффекты старения или деградации

элементов. Значение несущей частоты колебаний опорного генератора зависит и от внешних дестабилизирующих факторов, главный из которых – температура окружающей среды. **Температурный коэффициент уходов частоты** (ТКЧ) измеряют при номинальной температуре в относительных долях, отнесенных к 1°C. Термокомпенсированные генераторы могут иметь низкий ТКЧ в одном интервале температур, тогда как в более широком интервале этот показатель может существенно возрасти.

Форма выходных колебаний в течение периода любого опорного автогенератора не вполне гармоническая, а в качестве опорных тактовых обычно используются импульсные сигналы релаксационных источников колебаний. Характеристика **искажений** формы гармонических колебаний представляет собой уровень мощности высших гармоник в  $S_m(f)$  на частотах  $2f_0$  и  $3f_0$  или мощность всех паразитных спектральных компонент в широкой полосе частот по отношению к мощности на несущей частоте.

Для стабильных по частоте опорных генераторов необходимо учитывать **ограничение на выходную мощность**. Превышение ее допустимых значений приводит к росту температуры стабилизирующего частоту резонатора, что увеличивает отклонения частоты. Кроме того, при увеличении мощности активного элемента возрастает уровень естественных (дробовых и тепловых) шумов, влияющих на флуктуации частоты.

Для опорных генераторов с навесными элементами колебательной системы важным параметром может стать **чувствительность по отношению к механическим воздействиям** (вибрациям с определенной частотой или ударам), измеряемая в единицах ускорения свободного падения (g).

Чтобы устанавливать номинал частоты по более точному эталону и компенсировать долговременный дрейф частоты, высокостабильные автогенераторы и даже генераторы с прецизионной стабильностью обычно имеют дополнительные средства коррекции начальной фазы или управления частотой в небольших пределах [1].

**ВИДЫ ОПОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

Основные характеристики опорных генераторов – средняя частота  $f_0$ , кратковременная  $\delta_k$  и долговременная  $\delta_d$  относительные нестабильности частоты, вид активного элемента автогенератора, способ стабилизации частоты, форма выходного колебания и его уровень. Кроме того, модели и серии генераторов отличаются массогабаритными показателями, энергоемкостью, интервалом внешних дестабилизирующих факторов, определяющих режим устойчивой работы. Поэтому близкие на первый взгляд генераторы могут отличаться по стоимости в десятки раз.

При невысоких требованиях к стабильности частоты активными элементами тактовых генераторов служат узлы цифровой логики. В ВЧ-диапазоне – это элементы на основе маломощных биполярных или, чаще, полевых транзисторов. В СВЧ-диапазоне могут также применяться диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды или электровакуумные автогенераторы (отражательный клистрон, магнетрон). Вторичные эталоны частоты функционируют на основе квантовых переходов в сортируемых или стимулируемых подкачкой пучках (колбах) с атомными частицами.

В первом приближении нестабильность частоты обратно пропорциональна квадрату эквивалентной добротности фазочастотной характеристики колебательной системы генератора. Так, эквивалентная добротность релаксационных генераторов с RC-колебательной системой порядка десяти и их кратковременная нестабильность частоты колебаний велика – порядка 1%. Для LC-генераторов с добротностью контура 50–100 кратковременная относительная нестабильность частоты составляет 100–500 ppm. Добротность резонаторов на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) может быть порядка десятков тысяч, металлических и диэлектрических резонаторов – от нескольких тысяч до сотен тысяч, кварцевых – несколько миллионов. Эквивалентная добротность атомных переходов достигает  $10^7$ – $10^8$ . Следовательно, эти источники характеризуются высокой стабильностью частоты.

**РЫНОК ОПОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

Опорные генераторы – необходимые в любом электронном устройстве компоненты. Поскольку диапазон востребованных в электронной технике значений средней частоты и ее стабильности необычайно широк, на мировом рынке представлены опорные генераторы десятков тысяч моделей [2]. Достижение компромисса между рабочей частотой, уровнем нестабильности и выходной мощностью в заданном интервале дестабилизирующих факторов и при ограничениях на массогабаритные показатели и энергопотребление требует непрерывного научно-технического совершенствования этих изделий и высокой технологической культуры производителей. Отрадно отметить, что в этой нише отечественные производители конкурентоспособны с зарубежными фирмами (см. перечень ведущих производителей генераторных изделий).

**Стандарты частоты и времени** с относительной погрешностью установки частоты не хуже  $1 \cdot 10^{-10}$  (табл. 1) представляют собой изделия, пользующиеся широким спросом на рынке. Электронные схемы переноса стабильности большинства этих изделий, опираясь на уникальные частоты квантовых переходов, обеспечивают номинальные значения выходных частот 1, 5 или 10 МГц с гарантированным числом нулевых десятичных разрядов. Выходные сигналы стандартов частоты обычно имеют гармоническую форму с уровнем искажений от -30 до -85 дБ и амплитуду не менее 0,5 В на нагрузке 50 Ом. В ряде моделей предусмотрены дополнительные когерентные выходные импульсы секундного диапазона для сигналов

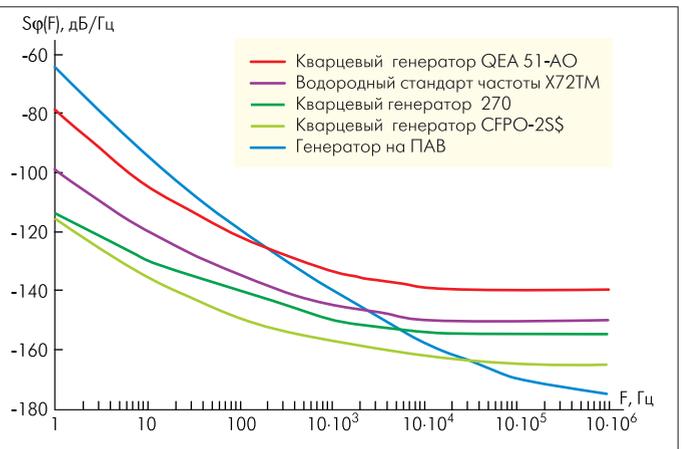


Рис. 1. Фазовые шумы вблизи несущей

Таблица 1. Параметры стандартов частоты и времени

Модель/сайт	Активный элемент <sup>1)</sup>	$\delta_k$ (Т)		Искажения, дБ	Sφ, дБ/Гц			Дрейф $\delta_d$ (Т)		Прогрев, мин	ТКЧ, °С	Энергопотребление, Вт	Масса, кг	Особенности <sup>2)</sup>
		1 с	100 с		10 Гц	100 Гц	1 кГц	Сутки	Год					
CH1-75B /www.quartzlock.com	В+ПК	$2 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-14}$	–	-135	-152	-158	$3 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-16}$	–	$5 \cdot 10^{-16}$	100	90	СС-20
Ч1-75А /www.kwarz.ru	В	$1 \cdot 10^{-13}$	–	–	–	–	–	$2 \cdot 10^{-15}$	$\pm 3 \cdot 10^{-12}$	–	–	–	90	
CH176 /www.quartzlock.com	В+Ц+ПК	$1 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-13}$	-30	-120	-140	-150	$1 \cdot 10^{-15}$	–	–	$2 \cdot 10^{-14}$	–	55	GPS
Times Cesium /www.symmetricom.com	Ц	$2 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-12}$	-110	-126	-140	-160	$3 \cdot 10^{-11}$	–	30	$2 \cdot 10^{-12}$	40	–	КУ-7
PRS-10 /www.srsys.com	Р	$2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-12}$	-130	-130	-140	–	–	$5 \cdot 10^{-10}$	6	$\pm 1 \cdot 10^{-10}$	40	0,6	КУ-6
FE-5660A /www.frequelec.com	Р	$1 \cdot 10^{-11}$	–	-60	-100	-125	-145	$2 \cdot 10^{-11}$	–	6	$3 \cdot 10^{-10}$	10	0,6	КУ-6
X72TM /www.symmetricom.com	Р+ПК	$3 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	-60	-90	-128	-140	–	$5 \cdot 10^{-9}$	5	–	10	0,25	CDMA, GSM; КУ-6
P400 /www.quartzlock.com	Р+ПК	$3 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-12}$	-80	-100	-125	-135	–	$5 \cdot 10^{-10}$	5	–	45	0,6	GPS, CDMA
RFS-2002 /www.rirt.ru	Р	$4 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-12}$	–	–	-130	-145	$1 \cdot 10^{-12}$	–	5	$2 \cdot 10^{-12}$	14	1,3	СС-10
PFRS-01/www.temex-tmх.com	Р	$\pm 1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-12}$	–	–	–	–	–	–	–	$\pm 1 \cdot 10^{-11}$	–	–	КА; СС-20; Н
Time Source 3000 /www.symmetricom.com	ПК	$1 \cdot 10^{-11}$	–	-80	-126	-136	-150	$\pm 1 \cdot 10^{-11}$	–	20	–	–	1,5	М; ТТ
MOT(C) /www.tekelec-temex.com	ПК	$\pm 1 \cdot 10^{-10}$	–	–	-120	–	–	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-8}$	–	–	12	0,25	GPS, CDMA
253 /www.mti-milliren.com	ПК	$1 \cdot 10^{-12}$	–	-100	–	-150	-160	$5 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-8}$	15	$2 \cdot 10^{-10}$	3	–	КУ-6

<sup>1)</sup> Р – рубидиевый; Ц – цезиевый; В – водородный; ПК – с прецизионным кварцевым резонатором; <sup>2)</sup> КУ-6, КУ-7 – кодовое управление частотой в пределах  $10^{-6}$  и  $10^{-7}$ ; CDMA, GSM, GPS – адаптирован к стандартам связи; СС-20 – срок службы 20 лет; СС-10 – срок службы 10 лет; М – военные условия; КА – адаптирован для космических аппаратов; ТТ – твердотельное исполнение; Н – носимый.

**Таблица 2. Параметры прецизионных кварцевых генераторов**

Серия моделей/ сайт	$f_0$ , МГц	$P_{\text{вых}}$ <sup>1</sup> , дБмВт	$\delta_c$ (1 с)	$S_{\Phi}(F)$ , дБ/Гц			$\delta_{A_1}$ <sup>1</sup> /г	$T_r$ , мин	НДТ <sup>1</sup> , °С	Масса, г	Размеры, мм	Питание		Особенности <sup>2</sup>
				10 Гц	1 кГц	100 кГц						$E_n$ , В	$I_0$ , мА	
EX-380 /www.vectron.com	10	+7	$5 \cdot 10^{-12}$	-135	-150	-155	0,08	2	-55-85	—	3,4x3,4x3	+3,3	70	В
QT2002 /www.q-tech.com	10	+5	$1 \cdot 10^{-8}$	-90	-135	-137	0,01	0,02	-50-85	60	38x38x12	+5	20	МСХО, С, J-5
ASOV5S3E /www.conwin.com	10; 12	+4	$5 \cdot 10^{-11}$	-115	-135	-140	300	5	0-0	—	20x13x2	+3,3	300	С, ПМ, ОСХО; J-1
CFPO-2S /www.cmac.com/mt/	5–13	+4	$5 \cdot 10^{-12}$	-135	-160	-165	0,008	15	-20-60	80	51x51x38	+12	700	S+C; Y-50g
QED 67-AO /www.tekelec-temex.com	5–16	+5	$2 \cdot 10^{-12}$	-100	—	-155	0,01	5	-40-85	200	20x20x6	+12	30	Г; Y-50g
FE-103A /www.fregelec.com	5–20	+7	$1 \cdot 10^{-11}$	-138	-150	-155	0,3	5	-10-60	—	5x5x7	+15	200	ОСХО
FE-205A, FE-405A, FE-505A /www.fregelec.com	5–25	+9	$1 \cdot 10^{-11}$	-95	-135	-145	0,01	—	-55-85	—	5x5x4	+5	200	РСЧ; ЦУ-1; ОСХО
270 /www.mti-milliren.com	0,004–30	+9	$1 \cdot 10^{-12}$	-140	-155	-155	0,01	10	-30-70	—	—	+12	140	ЦУ-500; S+C
HFX323QN /www.murata.com	13–40	+10	$2 \cdot 10^{-6}$	—	-120	—	$1 \cdot 10^{-6}$	0,01	-40-85	—	5x3x1,2	+2,8	1,5	ПМ, ТСХО, ЦУ-7
QEA 51-AO /www.tekelec-temex.com	4–60	0	$1 \cdot 10^{-7}$	—	-110	-140	$\pm 0,5$	5	-55-105	—	36x26x14	+5	10–50	ЦУ-5
FTS 9300 /www.symmetricom.com	45–135	+7	$5 \cdot 10^{-12}$	-100	-137	-140	0,01	15	-10-60	170	8x4x3	+15	100	S+C; ПМ
205 /www.mti-milliren.com	8–200	+7	$5 \cdot 10^{-12}$	-85	-150	-160	0,5	5	-30-70	—	—	+5	90	ЦУ-10; Г

<sup>1</sup>) НДТ – наибольший диапазон температур; <sup>2</sup>) ПМ – поверхностный монтаж; Ст – заранее состарен; ТТЛ – выход уровня ТТЛ; Ц-<sup>\*</sup> – электронное управление на  $\pm^*$  ppm; S – выход гармонической формы; С – выход HCMOS уровня; Г – герметичное исполнение; В – вакуумированный резонатор; Y-50g – ударопрочность 50 g; РСЧ – заменяет рубидиевый стандарт частоты; J-x – дрожание фазы не более x пс.

опорного времени и возможность смещения шкалы времени на десятки наносекунд. Выходную частоту моделей PRS-10, P400 и PFRS-01 можно изменять с помощью внешнего кода в пределах до  $10^{-6}$  от номинала.

Водородные мазеры (Ч1-75А, СН1-75В) характеризуются наивысшей долговременной стабильностью частоты, достигающей  $1 \cdot 10^{-15}$ /год. Долговременная стабильность цезиевых стандартов Times Cesium достигает  $5 \cdot 10^{-13}$ , рубидиевых (PRS10, P400, FE-5660A) –  $\pm 5 \cdot 10^{-12}$ , кварцевых –  $5 \cdot 10^{-10}$ .

Квантовые стандарты частоты характеризуются достаточно низким уровнем фазового шума  $S_{\Phi}(F)$  при очень малых отстройках от несущей частоты (рис.1, фиолетовая линия): от -110 дБ/Гц при отстройке 1 Гц до белого фазового шума на уровне около -160 дБ/Гц (Times Cesium). Во многом низкий уровень фазовых шумов вблизи несущей обусловлен используемой в этих стандартах многоступенчатой синхронизацией колебаний. Так, в СН176 по сигналу водородного лазера синхронизируются колебания подстраиваемого цезиевого источника, а по ним – прецизионного управляемого кварцевого генератора. Такие меры позволяют снизить собственный фазовый шум схемы переноса стабильности частоты. Специфический параметр атомных стандартов – срок службы, который ограничен деградацией вакуума в колбе. Гарантируемый срок службы для модели СН1-75В – 20 лет, для ряда других водородных мазеров – 10–15 лет без откачки.

Фазовые шумы прецизионных кварцевых стандартов частоты – модели MOT(C), Time Source 3000 – ниже, чем у рубидиевых (до -126 дБ/Гц при отстройке 10 Гц и до -165 дБ/Гц при отстройке 10 кГц), при сравнимых значениях кратковременной нестабильности частоты и массогабаритных показателей. Их недостаток в сравнении с атомными стандартами – меньшая долговременная стабильность из-за старения кварца, преимущество – наличие устройств цифровой коррекции номинальной частоты.

Многие изделия (X72TM, P400 и др.) адаптированы для применения в определенных стандартах связи или навигации: кроме стандартных частот 1 и 10 МГц возможно формирование когерентных синусоидальных или импульсных колебаний на стандартизованных в этих системах частотах.

Высокие показатели стабильности стандартов частоты обеспечиваются после установления теплового режима, которое длится от 2 ч до 5–6 мин (модели P400, RFS-2002 и др.). Во время активного прогрева потребляемая мощность увеличивается в несколько раз.

**Прецизионные кварцевые генераторы** (табл.2) по уровню нестабильности частоты сопоставимы со стандартами. Они имеют небольшие размеры и массу, устойчивы к ударам и вибрациям. Возможно выполнение кварцевого резонатора на заданную рабочую частоту с малыми фазовыми шумами.

Семейство автогенераторов с кварцевыми резонаторами весьма разветвленное. Наряду с обычными кварцевыми генераторами (Crystal oscillator – XO) можно отметить вакуумированные миниатюрные (Evacuated miniature... – EMXO); прецизионные

(Precision... – PXO); тактовые (Clock XO); термостабилизированные (Oven controlled... – OCXO); термокомпенсированные (Temperature compensated... – TCXO); с цифровой компенсацией (Digitally compensated... – DTCXO); с микропроцессорной компенсацией (Microprocessor compensated... – MCXO); управляемые напряжением по частоте (Voltage controlled... – VCXO); синхронизированные по фазе (Phase locked... – PLO). Эти группы весьма существенно отличаются друг от друга как по характеристикам стабильности и управления, так и по стоимости.

Кварцевые резонаторы вырезаются из кристалла пьезокварца под определенными углами к его осям (срезы AT, BT, SL, SC, inverted mesa), что обеспечивает термокомпенсацию в определенном температурном интервале. Генераторы типа OCXO используют внутреннее термостатирование резонатора (например, в модели FE-103A). Вакуумирование кварцевого резонатора (модель EX-380) повышает его устойчивость к изменениям температуры и климатическим изменениям, снижает фазовые шумы.

Особенность кварцевых резонаторов – явление старения. Наибольший дрейф частоты  $\delta_d$  наблюдается в первый год работы, после чего этот параметр снижается в три-пять раз (модель QED 67-AO). Некоторые производители используют заранее состаренные резонаторы.

Основная резонансная частота кварцевых резонаторов обычно не превышает 30–40 МГц, что обусловлено возможностями крепления сверхтонких пластин пьезокварца. Частота модели FTS 9300 с особыми срезом и формой резонатора достигает 135 МГц. Повысить частоту генерации можно за счет работы на третьей или пятой механических гармониках кварцевого резонатора. Однако при этом снижается эквивалентная добротность колебательной системы и возрастает частотная нестабильность. Высшие механические гармоники используются в моделях TCXO для температурной стабилизации частоты основных колебаний.

Тепловой режим кварцевого генератора после включения устанавливается за время  $T_r$ , составляющее от 15 мин (модель FTS 9300) до 2 мин или даже 10 с (модель HFX323QN). Малое время установления достигается благодаря временному повышению прогревающей мощности и авторегулировке температуры кристалла. Некоторые производители указывают продолжительность выхода из спящего режима, которая измеряется тысячными долями секунды.

Встроенные цифровые или микропроцессорные схемы термокомпенсации обеспечивают прецизионную стабильность частоты

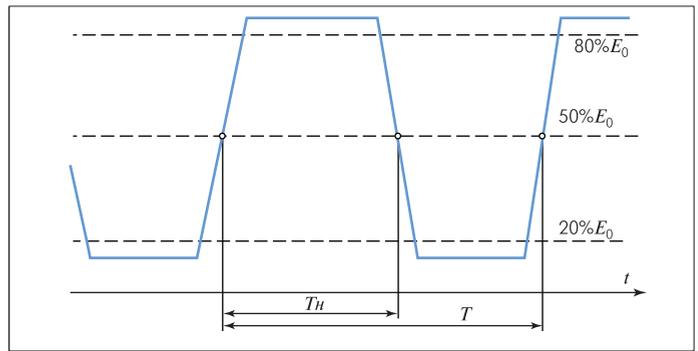


Рис.2. Оценка симметричности тактового импульса

в расширенном интервале температур (модель HFX323QN). Суточная нестабильность частоты микропроцессорного кварцевого генератора типа MCXO модели QT2002 не превышает  $1 \cdot 10^{-9}$ . Эта модель характеризуется малым уровнем дрожания фазы; низким фазовым шумом при умеренных габаритах и массе (60 г). В нем, кроме гармонического, предусмотрены импульсные выходы с частотами 1,000 Гц и 1,000 кГц, средства автоматической коррекции старения и дрейфа фазы до 550 мс по внешнему синхросигналу. В модели 270 предусмотрена электронная коррекция частоты в больших пределах – до 500 ppm.

Прецизионные кварцевые генераторы могут иметь субминиатюрное или герметичное исполнение (модель 205). Некоторые модели (FTS 9300) с весьма высокой стабильностью допускают поверхностный монтаж и имеют дополнительный выход TTL- или КМОП-уровня с высокой плотностью компоновки.

Фазовые шумы вблизи несущей частоты для разных моделей кварцевых генераторов заметно различаются (см. рис.1): их уровень может быть даже ниже, чем у атомных стандартов (уровень белого фазового шума в модели CFPO-2S достигает -165 дБ/Гц), поскольку не требуется сложная схема переноса стабильности.

**Тактовые генераторы** (табл.3) используются в микропроцессорных устройствах управления, компьютерах, вычислительных комплексах. Как правило, при этом к показателю стабильности частоты не предъявляются очень высокие требования. Основные требования к тактовым генераторам: рабочая частота до нескольких сотен мегагерц, совместимость с используемой цифровой логикой, трапециевидальная форма выходного сигнала, малый уровень дрожания фазы, возможность поверхностного монтажа, экономичность. Их специфические параметры – заданная форма выходных импуль-

Таблица 3. Параметры тактовых генераторов

Модель/сайт	$f_0$ , МГц	Логические уровни <sup>1)</sup>	$\delta_k$ , млн <sup>-1</sup>	$T_{вкл}$ , мс/ $T_{сп}$ , нс	НС <sup>2)</sup> , млн <sup>-1</sup>	$k_c$ , %	$\delta_d$ , млн <sup>-1</sup>	$J$ , пс	НДТ <sup>4)</sup> , °С	Размеры, мм	Питание		Особенности <sup>3)</sup>
											$E_0$ , В	$I_0$ , мА	
M55310/08 /www.q-tech.com	0,001–50	T	±25	–/5	–	40/60	±10	–	–55...+125	–	+5	25	M; 2K
F510L /www.foxonline.com	1,8–50	H	±20	10/5	–	40/60	–	–	–40...+85	5x3x1,5	1,8	7	ПМ
M1270, M1272/ www.mfelec.com	8–67	T	±50	–/4	–	45/55	1	–	0...+70	–	+5	55	2K; ПМ
T12, T19, T32, T39 /www.mfelec.com	0,001–67	T	±10	5/4	–	45/55	–	–	0...+70	–	+5	10	3С
QCC570 /www.q-tech.com	1,8–105	C, T	±50	5/3	±10	45/55	±10	–	–50...+85	7x5x1,5	+3,3	20	VCXO; 3С
SXO550/www.ctscorp.com	14–120	E, H	±50	–/3	–	40/60	–	–	0...+70	–	+5	100	–
HM-57 /www.mercury-crystal.com	8–165	T, H	±25	5/–	–	48/52	±5	250	–40...+85	5x7x1,8	–	–	PC
QEN49-BE-AY /www.tekelec-temex.com	14–160	A, E, T	±25	10/2	–	35/65	1	–	–55...+125	18x15x5	+5	20	M
M7S, M8S/www.mtron.com	25–155	H+T	±25	6	±50	45/55	25	5	–40...+85	7x4x0,9	+0,5...4,5	35	3С
SDS3811 /www.saronix.com	104–350	L	–	–/1	–	45/55	–	8	–40...+85	–	+3,3	25	ПМ
CO-231, CO-231H /www.vectron.com	75–600	T	±1	–/2	–	45/55	1	–	–55...+200	97x97x30	±5	30	M
CO-45/www.vectron.com	5–700	E	±1	–	–	45/55	2	–	–55...+125	1,3x2x0,5	–5	60	ПМ; M
350/www.ctscorp.com	416–750	DE	±15	–/225	–	45/55	±10	1	–40...+85	9x14x2	3,3 или 5	45	ПМ

<sup>1)</sup> T – выход TTL-логики; E – выход ЭСЛ-логики; DE – дифференциальные выходы ЕСЛ; H – выход HCMOS-логики; A – выход ACMOS-логики; L – LVDS; <sup>2)</sup> НС – нагрузочная способность; <sup>3)</sup> ПМ – для поверхностного монтажа; 3С – трехстабильные состояния; M – военные условия применения; 2K – два кристалла в корпусе; PC – расширение спектра для улучшения ЭМС; <sup>4)</sup> НДТ – наибольший температурный диапазон.

**Таблица 4. Параметры СВЧ-генераторов**

Серия / сайт	Тип <sup>1)</sup>	$f_0$ , ГГц	$P_{\text{вых}}$ дБмВт	$\delta_k$ , ppm	$S_p$ (10 кГц), дБ/Гц	$A_{\text{гарм}}$ дБ	Перестройка частоты <sup>2)</sup>		Размеры, мм	НДТ, °С	Питание		Особен- ности <sup>3)</sup>
							Э, %	М, %			$E_0$ , В	$I_0$ , мА	
D60**/www.gmcwave.com	О	0,5–23	27–7	±50	-110	-30	–	20	144x90x43	-30–65	±15, +5, +28	1000	2Ч
CRO/www.atlanticmicrowave.co.uk	КР	0,3–3	13–20	±2	-115	-15	–	–	44x27x13	-55–85	+15	125	–
ОТС-ХС/www.miteq.com	О	1–6	23–16	100	-115	-20	1	–	–	-30–75	+15	150	–
DRO-FT-10/www.pmmt.net	Д, Т	2–12	10	500	-80	-20	–	–	–	-30–85	+5...15	250	–
NHO/www.nardamicrowave.com	Д	6–18	14	±300	-90	-25	0,1	–	–	-54–85	+15	125	У-75g
PDRO-M/www.raditek.com	Д	8–18	6	50	-95	–	–	0,1	–	-40–60	+5	50	–
С/www.cti-inc.com	О	0,5–23	27–10	500	-110	–	–	5	–	-30–65	–	–	–
DRO1218, DRO1227/www.pmmt.net	Д	12–27	10	5	-85	-25	0,3	2	25x25x12	0–60	+5–15	150	Г
DRO-1000-XX.XX /www.microwave-dynamics.com	Д	2,4–26	13–25	4	-106	-25	0,3	0,5	55x24x17	-55–95	+5 (+12)	90	Ам; Р
MLOS-02XXT/www.micro-lambda.com	Ж	2–26	13–8	500	-97	-12	500	–	–	0–65	+20	100	ГКЧ; Гист-15
DRO/www.miteq.com	Д	2,4–30	7–13	5	-95	-20	0,1	0,15	–	-20–70	–	–	М
QTS/www.quinstar.com	Л	34–97	30–15	10	–	–	–	3	–	–	+50	300	в/в
QTM/www.quinstar.com	Г	18–150	27–0	5	–	–	–	10	–	-55–70	+12	1000	р/м; в/в
Серии GIL и GDV/www.millitech.com	х4	18–156	-10–18	–	–	-20	8–14	–	–	–	–	–	р/м; в/в

<sup>1)</sup>Д – диэлектрический резонатор; О – объемный металлический резонатор; КР – коаксиальный резонатор; Ж – ЖИГ-перестройка; Г – диод Ганна; Л – лавинно-пролетный диод; Т – транзистор; х4 – множитель частоты в четыре раза; <sup>2)</sup>Э – электронная перестройка; М – механическая перестройка; <sup>3)</sup>Г – герметическая конструкция; У-75g – ударостойкость 75 g; М – миниатюрная конструкция; Р – встроенный регулятор напряжения; Ам – амортизированная конструкция; ГКЧ – генератор качающейся частоты; Гист-15 – гистерезис 15 МГц; 2Ч – двухчастотный генератор, в/в – волноводный выход; р/м – для радиометрии.

сов, наличие трех стабильных уровней выходного сигнала, допустимый уровень регулярного дрожания фазы  $J$ .

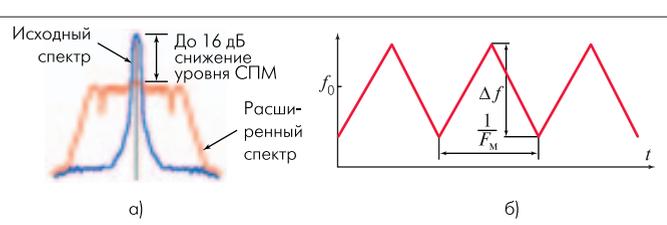
Выходные сигналы тактовых генераторов предназначены для ТТЛШ, ЭСЛ, КМОП и т.п. цифровой логики. Симметричность сигнала по отношению к пороговым уровням логических элементов  $k_c$  характеризуется отношением времени, требуемого для превышения середины между логическими уровнями (duty cycle), к периоду колебаний  $k_c = (T_H/T) \cdot 100\%$  (рис.2). Коэффициент симметричности модели серии M55310/08 составляет 48–52%.

Нагрузочная способность некоторых тактовых генераторов (серия M7S/M8S) нормируется по допустимому изменению частоты при сбросе активной нагрузки. Для всех опорных генераторов отдельно указывают значения времени выхода на режим после включения питания  $T_{\text{вкл}}$  и после спящего режима  $T_{\text{сп}}$ , которые различаются в 1000 раз.

Ряд фирм-производителей опорных генераторов добились чрезвычайно широкого температурного интервала, в котором изделия сохраняют заданные качественные показатели. Например, компания Q-tech выпускает серию КМОП-генераторов M55310, отдельные модели которой работают в интервале температур -55–200°С. То же можно сказать и об изделии СО-231 фирмы Vectron. При необходимости можно приобрести тактовые генераторы, выходной сигнал которых имеет три стабильных состояния.

Введение режима расширения спектра (Spread Spectrum) тактовых генераторов позволило улучшить характеристики электромагнитной совместимости (ЭМС) вычислительных устройств и снизить их радиозаметность (рис.3).

Спектральная плотность мощности обычного тактового генератора сосредоточена вблизи средней частоты  $f_0$  и ее гармоник. В паразитном ВЧ-излучении компьютера, микропроцессора, монитора или иного тактируемого устройства содержатся пиковые спектральные и временные компоненты, нарушающие нормы электромагнитной совместимости и позволяющие получить несанкционированный доступ к обрабатываемой информации. В модели тактовых генераторов с расширением спектра введены средства внутренней частотной модуляции, благодаря чему удается распределить энергию сигнала тактового генератора по полосе частот в пределах 0,5–3% от  $f_0$  и тем самым снизить пиковые значения СПМ, нарушающие требования ЭМС. Так, в серии HM57 при средней частоте



**Рис.3. СПМ паразитных радиоищлучений тактовых генераторов серии HM57 (а) и закон модуляции ее средней частоты (б)**

8–165 МГц можно установить режим качания средней частоты по треугольному во времени закону с девиацией до  $\Delta f = 10$  МГц и с частотой повторения  $F_M = (18–58)$  кГц (рис.3б). За счет этого пиковые значения СПМ всех паразитных ВЧ-излучений снижаются на 12–16 дБ. Расширенный спектр можно располагать симметрично по отношению к исходному спектру (рис.3а) или смещать относительно него. Допускается выбор или программирование параметров закона модуляции частоты. Изготовители тактовых генераторов с расширением спектра выпускают модели для замены существующих генераторов, не имеющих такой функции.

Тактовые генераторы выпускаются в различном конструктивном исполнении, в том числе и для поверхностного монтажа (рис.4). Можно отметить их высокую прочность по отношению к линейным ускорениям (до 5000 g), возможность выбора формы выходного сиг-

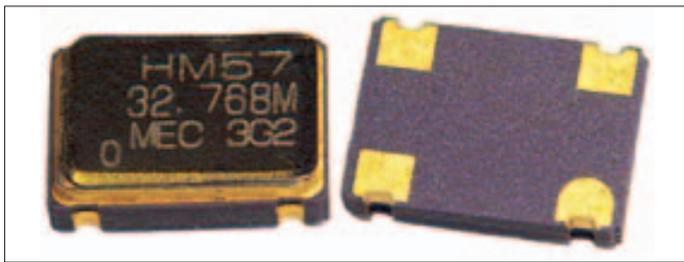


Рис.4. Вид тактовых генераторов серии HM57

нала – гармонического, КМОП с высокой плотностью компоновки, АСМОС, возможность работы с трехстабильными состояниями, наличие входа синхронизации от внешнего эталона. Ряд моделей (например, M1270) содержат в одном корпусе два кварцевых резонатора с заданными частотами, что позволяет однотипно выполнять гетеродины приемного и передающего устройств линии радиосвязи.

В качестве тактовых могут использоваться также стабильные по частоте кварцевые генераторы типа МСХО или ОСХО, имеющие, кроме гармонического, импульсные, ТТЛ-, ЭСЛ- или другие выходы (см. табл. 2).

**Генераторы СВЧ** (табл.4) используются в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц. Стабилизация их частоты генерации кварцевыми резонаторами невозможна, поэтому либо требования к стабильности частоты снижаются, либо применяются другие типы стабилизирующих резонаторов, либо используются средства фазовой синхронизации частоты СВЧ-колебаний по эталону частоты.

Качество опорных СВЧ-автогенераторов оценивается по дополнительным параметрам [1], характеризующим влияние фазы коэффициента отражения от нагрузки (frequency pulling) и вариаций питающего напряжения (pushing) на частоту.

Автогенераторы на ПАВ отличаются повышенной до +10–+23 дБмВт выходной мощностью и малым уровнем фазовых шумов. Так, значение белого фазового шума серии генераторов M4001/M4002 фирмы M-tron Industries чрезвычайно низкое – -175 дБ/Гц при отстройке 100 кГц от частоты 2 ГГц (рис. 1, синяя линия).

Применение диэлектрических резонаторов (Dielectric Resonator Oscillator – DRO) (серии DRO, PDRO-M) позволяет увеличить выходную частоту до 30 ГГц при стабильности порядка 100–400 ppm. Фазовые шумы вблизи несущей частоты генераторов фиксированных частот с сапфировыми резонаторами на диапазон 8–10 ГГц и выходную мощность +13 дБмВт (модели SHOBOX Oscillator и SLCO фирмы Poseidon Scientific Instruments) исключительно низкие. В генераторах серии DRO-1000-XX предусмотрены внутренний регулятор питающего напряжения, средства снижения микрофонного эффекта, усилитель мощности до уровня от +13 до +25 дБмВт на частотах до 26 ГГц при весьма низком уровне фазового шума (-130 дБ/Гц при отстройке 10 кГц от частоты 20 ГГц). Техника дисковых диэлектрических резонаторов позволяет создавать СВЧ-генераторы, превосходящие по значению стабильности кварцевые и даже атомные устройства. Пока применение этой техники сдерживается проблемой воспроизводимости значения частоты от одного экземпляра резонатора к другому и высокой стоимостью изготовления.

Фирма Micro Networks выпускает генераторы на ПАВ (модель PLO-800-100) на частоты от 100 МГц до 2 ГГц с высокой фазовой стабильностью и возможностью электронной перестройки.

В автогенераторах миллиметрового диапазона серии DRO-FT-10 используется арсенидгаллиевый полевой транзистор с затвором Шоттки (MESFET). В серии QTM этого же диапазона применен диод Ганна. Использование в качестве активного элемента лавинно-

пролетного диода (серия QTS) позволило увеличить мощность генераторов миллиметрового диапазона до +30 дБмВт.

К опорным генераторам примыкает группа электронных компонентов типа PLO, которая служит для переноса стабильности вверх по частоте: умножители частоты высокой кратности (Frequency Multipliers) и системы фазовой автоподстройки частоты (PLL) [1]. В отличие от полномасштабных синтезаторов сетки стабильных частот в них отсутствуют средства организации мелкого шага по частоте: нужный номинал выходной частоты задается в исходном автогенераторе с кварцевым резонатором. Благодаря такому упрощению внутренней структуры собственный вклад этих компонентов в фазовые нестабильности небольшой.

Широкополосные умножители частоты (см. табл.4) используются для повышения номинала средней частоты опорного генератора при сохранении ее стабильности [1]. Многие фирмы (например, Mini-Circuits) выпускают удвоители частоты как пассивные узлы с ослаблением мощности на удвоенной частоте на 5–10 дБ. Умножители частоты с кратностью умножения N от 3–5 до 64 (фирмы Hittite, Marki MW, Millitech) при относительной полосе пропускаемых частот не менее 1–3% выполняются как активные компоненты с использованием усилителей или ФАПЧ. Несмотря на высокую кратность частот, их выходная мощность на 10–15 дБ выше, чем входная. Четверители частоты фирмы United Monolithic Semiconductors на арсенидгаллиевых диодах с выходной мощностью +11 дБмВт на частотах 36–40 ГГц при размерах 1,7x1x0,1 мм отвечают требованиям военных стандартов. Выходные частоты варакторных четверителей частоты серий MUT и AMC фирмы Millitech составляют 61–156 ГГц, выходная мощность – ~0,08–1,5 мВт, полоса частот 8–14% при входной мощности не более 50 мВт. Выходной сигнал мощных четверителей частоты миллиметрового диапазона фирмы Millitech с выходными частотами 18–100 ГГц достигает 70 мВт в полосе частот до 3% при коэффициенте передачи по мощности от +8 до +12 дБ. В модели LNC414-9700 фирмы Techtrol Cyclonetics использованы два прецизионных кварцевых генератора, схема умножения частоты в восемь раз и преобразователь частоты вверх. Это позволило создать источник опорного сигнала на частоте 9,7 ГГц с  $\delta_k = \pm 10^{-4}\%$ , старением  $\delta_d = 300$  ppm/год и белым фазовым шумом -138 дБ/Гц.

Модель PL5-42-15 фирмы Spacek Labs с источником сигнала типа PLO на основе ФАПЧ позволяет преобразовать эталонное колебание с частотой 10 МГц в гармонический сигнал с мощностью 70 мВт и фазовым шумом -98 дБ/Гц при отстройке на 100 кГц на выходной частоте 42 ГГц. В серии MDR5530 фирмы Magnum Microwave выходные сигналы с частотой 9–38 ГГц формируются с белым фазовым шумом -130 дБ/Гц, приведенным к выходной частоте 12 ГГц.

Таким образом, разработчики электронных устройств имеют широкий выбор моделей опорных генераторов в многомерном пространстве параметров: частота, стабильность и мощность при ограничениях на условия использования, конструктивные показатели и экономичность.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Белов Л. Компоненты генераторов стабильной частоты. Генераторы, управляемые напряжением. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №1, с.42; Преобразователи частоты. Современные ВЧ-компоненты. – №2, с.44; Синтезаторы стабильных частот. – №3, с. 38; Частотные фильтры. – №5, с.62.
2. РАДИОКОМП – радиокomпоненты мировых производителей. <http://www.radiocomp.ru>.