

# Генераторы СВЧ с применением ферритовых резонаторов

## Часть 2

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

УДК 621.389 | ВАК 2.2.2

В первой части статьи, опубликованной в пятом номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2023 год, было рассказано об основных особенностях ферритовых резонаторов и схемотехнике СВЧ-генераторов, созданных с их применением. В данном номере рассматриваются характеристики коммерческих ЖИГ-генераторов, выпускаемых различными производителями.

### КОНСТРУКТИВНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОММЕРЧЕСКИХ ЖИГ-ГЕНЕРАТОРОВ

В сравнении с LC-генераторами и генераторами на керамических и диэлектрических резонаторах ЖИГ-генераторы имеют несколько большие габариты за счет использования в них магнитной системы. Конструктивно (рис. 7) ЖИГ-генераторы делятся на кубические и цилиндрические (табл. 4), которые могут быть реализованы как на электромагнитах (см. рис. 4а), так и на постоянных магнитах (см. рис. 4б). Кубические ЖИГ-генераторы чаще всего имеют размеры 1,0"×1,0"×0,5", 1"×1"×1", 1,25"×1,25"×1,25", 1,4"×1,4"×1,4". Генераторы цилиндрической формы выпускаются в виде цилиндров различной высоты с диаметрами 0,625", 1,75" и 2,0". Высота ЖИГ-генераторов увеличивается с ростом частоты.

Часто ЖИГ-генераторы наряду с электрической перестройкой имеют и механическую подстройку частоты. У компании OMNIVIG в изделиях YOM2776, YOM2777, YOM2778, YOM2779, YOM2780, YOM2781 на постоянных магнитах функция механической подстройки является опцией, которая выбирается при заказе. Механическая подстройка частоты обеспечивается также и в трех моделях МЗ11123, МЗ11123 А и МЗ11124 компании «Феррит-Домен». Аналоговый драйвер является неотъемлемой частью этих ЖИГ-генераторов (рис. 8).

Широкая линейка ЖИГ-генераторов с использованием электромагнитов в стандартном (рис. 9а, б) и миниатюрном (рис. 9в, г) исполнениях выпускается компанией



Рис. 7. ЖИГ-генераторы кубической (а, б) и цилиндрической (в, г) формы



Рис. 8. ЖИГ-генератор на постоянных магнитах с электрической и механической перестройкой частоты (компания АО «НИИ «Феррит-Домен»)

<sup>1</sup> НИУ «МЭИ», профессор.

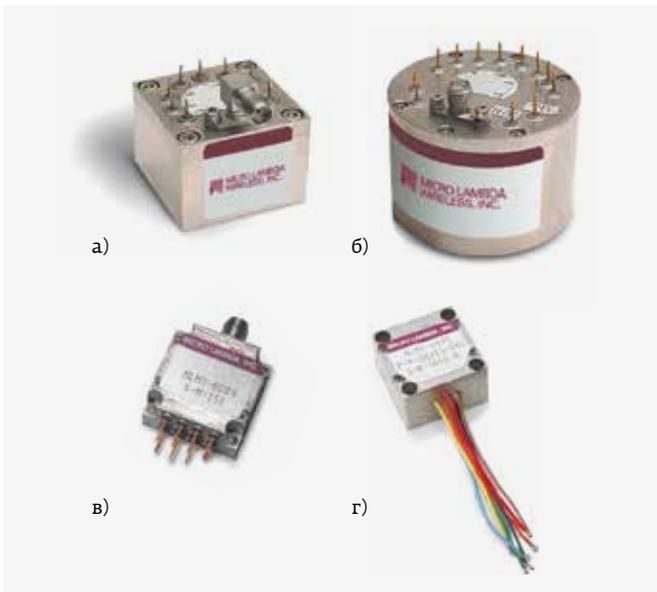
<sup>2</sup> ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

<sup>3</sup> НИУ «МЭИ», заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов, arsaфин@gmail.com.

**Таблица 4.** Характерные размеры ЖИГ-генераторов, реализованных на постоянных магнитах (ПМ) и электромагнитах (ЭМ)

Компания	Модель	Тип магнита	Диапазон частот, ГГц	Размеры, дюйм	Примечания
Endwave	UYOS09000-00	-	8-10	1,0×0,4×0,7	КС
MLW	MLOM-0412	ЭМ	4-12	1,0×1,0×0,5	КС
MLW	MLPC-1618	ПМ	16-18	1,0×1,0×0,5	КС
MLW	MLMB-0208	ЭМ	2-8	1,0×1,0×0,5	PCB
MLW	MLPB-0608	ПМ	6-8	1,0×1,0×0,5	PCB
OMNIYIG	YOM-2977	ЭМ	0,5-2,0	1,0×1,0×0,5	КС
MLW	MLXM-0618	ЭМ	6-18	1,0×1,0×1,0	КС
OMNIYIG	YOM-2982	ЭМ	6-12	1,0×1,0×1,0	КС
MLW	MLVG-1021	ЭМ	10-21	1,25×1,25×0,60	PCB/КС
MLW	MLPW-1418	ПМ	14-18	1,25×1,25×0,75	КС
MLW	MLXB-0220	ЭМ	2-20	1,25×1,25×0,94	КС
TMS	FS-2637	-	8-18	1,25×1,25×1,25	-
OMNIYIG	YOM-150	ЭМ	0,5-2,0	1,4×1,4×1,4	КС
TMS	FS-1035	-	8-18	1,4×1,4×1,4	-
MLW	MLPX-3644	ПМ	36-44	2,835×1,250×1,000	КС
MLW	MLOS-0310	ЭМ	3,5-10,5	∅1,75×1,17	Цилиндр высотой 1,17", КС
MLW	MLXS-0218	ЭМ	2-18	∅1,75×1,40	Цилиндр высотой 1,40", КС
OMNIYIG	YOM-2320	ЭМ	2-10	∅1,75×1,50	Цилиндр высотой 1,5", КС
MLW	MLXS-0220T	ЭМ	2-20	∅2,00×1,40	Цилиндр высотой 1,40", КС
MLW	MLOS-2640	ЭМ	26,5-40,0	∅2,00×1,55	Цилиндр высотой 1,55", КС
TMS	FS2772R-SMT	ПМ	4-8	0,70×0,70×0,53	Цилиндр ∅0,625" на п/п 0,7"×0,7", SMT
MLW	MLSMO-50204	ПМ	2-4	0,70×0,70×0,53	Цилиндр ∅0,625" на п/п 0,7"×0,7", SMT
MLW	MLSMO-50409	ПМ	4-9	0,70×0,70×0,56	Цилиндр ∅0,625" на п/п 0,7"×0,7", SMT
MLW	MLSMO-50613	ПМ	6,5-13,0	0,70×0,70×0,56	Цилиндр ∅0,625" на п/п 0,7"×0,7", SMT
TMS	FS2898-SMT	ПМ	6-13	0,70×0,70×0,63	Цилиндр ∅0,625" на п/п 0,7"×0,7", SMT
TMS	FS2900R-SMT	ПМ	8-16	0,70×0,70×0,78	Цилиндр ∅0,625" на п/п 0,7"×0,7", SMT
VIDA Products	DS1004LCB	-	10-20	0,9×0,9×0,3	SMT-корпус
MLW	MLTM-20204	ЭМ	2-4	∅0,625×0,270	ТО-8, PCB
MLW	MLTM-30306	ЭМ	3-6	∅0,625×0,350	ТО-8, PCB
MLW	MLTO-50409	ПМ	4-9	∅0,625×0,500	ТО-8, PCB
MLW	MLTO-50816	ПМ	7,9-16,1	∅0,625×0,500	ТО-8, PCB
TMS	FS-2772R-PCB	ПМ	4-8	∅0,625×0,500	ТО-8, PCB
TMS	FS-2898R-PCB	ПМ	6-13	∅0,625×0,600	ТО-8, PCB
TMS	FS-2900R-PCB	ПМ	8-16	∅0,625×0,750	ТО-8, PCB

Примечание: п/п – печатная плата, КС – коаксиальный соединитель.



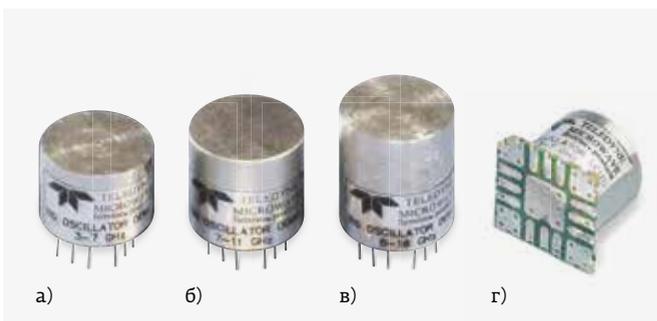
**Рис. 9.** ЖИГ-генераторы на электромагнитах компании Micro Lambda Wireless: а, б – стандартная конфигурация, рассчитанная на диапазон частот 0,7–40,0 ГГц; в, г – миниатюрные, рассчитанные на диапазон частот 0,7–10,0 ГГц

Micro Lambda Wireless (MLW). В трех из этих ЖИГ-генераторов подача постоянного напряжения осуществляется через штырьковые выводы, а вывод СВЧ-энергии – через коаксиальный соединитель (рис. 9а, б, в). В миниатюрном ЖИГ-генераторе (рис. 9г) подача питания и вывод СВЧ-энергии осуществляются по проводам. Кроме таких изделий выпускаются также ЖИГ-генераторы кубической или цилиндрической формы для монтажа в отверстия печатной платы (printed circuit board, РСВ) [10], в которых ввод/вывод энергии выполняется только через штырьковые выводы, вставляемые в отверстия платы (рис. 10) [10].



**Рис. 10.** ЖИГ-генераторы для монтажа в отверстия печатной платы кубической (а, б, в) и цилиндрической (г) формы

Цилиндрические ЖИГ-генераторы в РСВ-исполнении выпускаются в стандартных корпусах ТО-8 диаметром 0,625" (рис. 10г), высота которых может принимать различные значения (табл. 4). Одной из первых с такой продукцией вышла на рынок компания Teledyne Microwave Solutions (TMS), представившая ЖИГ-генераторы в корпусах ТО-8 со штырьковыми выводами под торговой маркой TINYIG (рис. 11а, б, в). Судя по уровню фазовых шумов, эти генераторы (табл. 5) реализованы на биполярных SiGe-транзисторах. Эти изделия могут также поставляться в корпусах для поверхностного монтажа (Surface Mount Technology, SMT) (рис. 11г). Линейные размеры 0,7" × 0,7" основания печатной платы такого ЖИГ-генератора несколько больше



**Рис. 11.** TINYIG-генераторы в корпусах ТО-8 компании Teledyne Microwave Solutions: а, б, в – РСВ-исполнение; г – SMT-исполнение



**Рис. 12.** ЖИГ-генераторы компании Micro Lambda Wireless в корпусах ТО-8: а – РСВ-исполнение; б – с СВЧ-соединителем; в – SMT-исполнение

диаметра 0,625" цилиндрической части базовых изделий (табл. 4). Помимо TMS подобные ЖИГ-генераторы поставляет и компания MLW (рис. 12). В одном из них (рис. 12б) вывод СВЧ-энергии осуществляется через коаксиальный соединитель.

ЖИГ-генераторы на постоянных магнитах часто изготавливают в малогабаритном исполнении (рис. 13). В этих изделиях питание подается через штырьковые выводы, а съем СВЧ-энергии осуществляется через штырьковый (рис. 13а, б), либо через коаксиальный (рис. 13в) вывод.

Оригинальные конструкторские решения [11, 12] были реализованы компанией Stellex (впоследствии перекуплена компаниями Endwave, а затем и Microsemi) в генераторах Mini-YIG (рис. 14а) и Micro-YIG (рис. 14б). В серии Mini-YIG генераторы выпускаются для диапазонов частот 3–5, 5–7, 7–9 и 9–11 ГГц, а в серии Micro-YIG – для диапазонов 4,5–6,5, 6,5–8,0 и 8,0–10,0 ГГц. Фазовые шумы во всех этих изделиях обеспечиваются на уровне –128 дБн/Гц при

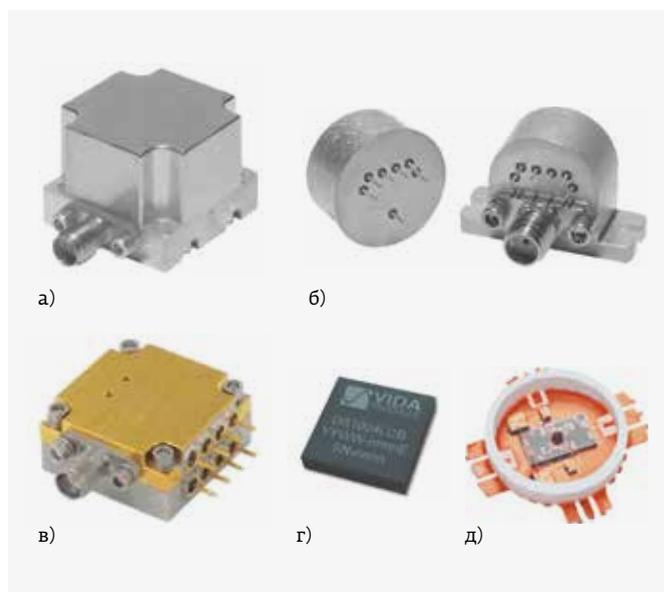


**Рис. 13.** ЖИГ-генераторы на основе постоянных магнитов компании Micro Lambda Wireless: а, б – со штырьковыми СВЧ-выводами; в – с коаксиальным СВЧ-соединителем

отстройке 100 кГц (табл. 6). Миниатюрные ЖИГ-генераторы кубической формы с размерами 1,0"×1,0"×0,5" выпускаются также компаниями OMNIYIG (YOM2977) и Gigatronics (рис. 14в). Последняя из этих компаний, кроме

**Таблица 5.** TINYIG-генераторы в корпусах TO-8, выпускаемые компанией Teledyne Microwave Solutions

Модель	FS2830R	FS2800R	FS2772R	FS2899R	FS2897R	FS2898R	FS2900R	FS3005R
Диапазон частот, ГГц	3,0–6,0	3,0–8,0	4,0–8,0	5,0–10,0	7,0–11,0	6,0–13,0	8,0–16,0	10,0–20,5
Выходная мощность, дБм	6	6	6	6	5	4	3	3
Уровень гармоник, дБн	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
Уровень негармонических составляющих, дБн	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70
Фазовые шумы, дБн/Гц, мин.:								
• отстройка 10 кГц;	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-98	-93
• отстройка 100 кГц	-125	-125	-125	-125	-125	-125	-123	-118
Температурный уход, МГц, макс.	±45	±45	±45	±50	±50	±50	±60	±60
Линейность, МГц, макс.	±2	±2	±2	±10	±20	±20	±45	±35
Гистерезис, МГц, макс.	15	15	15	15	25	25	60	60
Крутизна регулировочной характеристики в катушке:								
• грубой подстройки МГц/мА;	8	8	8	8	9	12	12	11
• точной подстройки, кГц/мА	300	300	300	300	300	350	300	350



**Рис. 14.** Миниатюрные ЖИГ-генераторы:  
а – Mini-YIG, компания Stellex; б – Micro-YIG, компания Stellex; в – LPO-0205-520-01, компания Giga-tronics;  
г, д – интегральные генераторы компании VID A Products

миниатюрных, выпускает модели ЖИГ-генераторов, отличающиеся высокой скоростью перестройки и низким уровнем фазовых шумов (табл. 7). В интегральном исполнении (рис. 14г, д) свои изделия, судя по рекламе, реализует компания VID A Products. Генератор DS1004LCB этой компании размером 0,9"×0,9"×0,3" в диапазоне частот 10–20 ГГц обеспечивает фазовые шумы <math>-145</math> дБн/Гц при отстройках более 1 МГц. Достижения компании при создании интегральных ЖИГ-генераторов базируются на полученном патенте [13]. Несколько миниатюрных ЖИГ-генераторов выпускает компания Raditek (табл. 8).

Отметим также, что практически все производимые в настоящее время ЖИГ-генераторы выполняются по тонкопленочной (thin film) микрополосковой технологии СВЧ-цепей, обеспечивающей более высокую надежность и меньшую стоимость изготовления.

Генераторы на ЖИГ-сферах обладают уникальными возможностями по полосе перестройки [1], в которой отклонения от линейного закона, аппроксимирующего реальную характеристику (рис. 15), находятся в пределах  $\pm 0,05 \dots \pm 0,25\%$ . Рабочие частоты ЖИГ-генераторов ограничены значениями  $f_{\text{н}} = 0,5$  ГГц снизу и  $f_{\text{в}} = 40\text{--}45$  ГГц сверху. По частотному перекрытию ЖИГ-генераторы можно

**Таблица 6.** Характеристики Mini-YIG и Micro-YIG генераторов, производимых компанией Endwave (Stellex, Microsemi)

Серия	Mini-YIG				Micro-YIG		
	MYOS04000-00	MYOS06000-00	MYOS08000-00	MYOS10000-00	UYOS05000-00	UYOS06750-00	UYOS09000-00
Диапазон частот, ГГц	3–5	5–7	7–9	9–11	4,5–6,5	6,5–8,0	8,0–10,0
Выходная мощность, дБм	14,5	14,5	14,5	14,5	10	10	10
Фазовый шум при отстройке 100 кГц, дБн/Гц	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128
Уровень негармонических составляющих, дБн	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60
Уровень гармоник, дБн	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
Крутизна регулировочной характеристики в катушке:							
• грубой подстройки, МГц/мА;	5	5	5	5	5	5	5
• точной подстройки, кГц/мА	150	150	150	150	150	150	150

Таблица 7. ЖИГ-генераторы, выпускаемые компанией MicroSource (Giga-tronics)

Модель	LPO-0205-520-01	LPO-0307-530-01	LPO-0408-530-01	LPO-0410-530-01	FTO-0307-540-01	FTO-0408-540-01	FTO-0410-540-01	MCO-0207-500-01	MCO-0210-500-01	MCO-0818-500-01
Диапазон частот, ГГц	2-5	3-7	4-8	4-10	3-7	4-8	4-10	2,0-7,6	2-10	8-18
$P_{\text{вых}}$ , дБм	11	11	11	11	11	11	11	15	12	15
ФШ при отстройке 100 кГц, дБн/Гц	-126...-120	-127...-120	-127...-120	-126...-120	-127...-120	-127...-120	-127...-120	-128...-125	-120	-115
Негармонические составляющие, дБн	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-60	-70
Гармоники, дБн	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-10	-10	-15
Линейность, %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,1
Крутизна регулировочной характеристики в катушке:										
• грубой подстройки, МГц/мА;	32	20	20	20	10	10	10	20	20	20
• точной подстройки, кГц/мА	300	310	310	310	310	310	310	310	310	300

Таблица 8. Характеристики миниатюрных ЖИГ-генераторов компании Raditek

Диапазон частот, ГГц	3,8-7,0	3,95-9,00	7,86-9,50
$P_{\text{вых}}$ , дБм	13	13	12
ФШ при отстройке 100 кГц, дБн/Гц	-128	-123...-115	-120
Паразитные составляющие, дБн	-70	-70	-60
Гармонические составляющие, дБн	-12	-12	-12
Линейность, %	±0,1	±0,1	±0,1
Крутизна регулировочной характеристики основной катушки, МГц/мА	10	15	9
Крутизна регулировочной характеристики настроечной катушки, кГц/мА	150	150	400

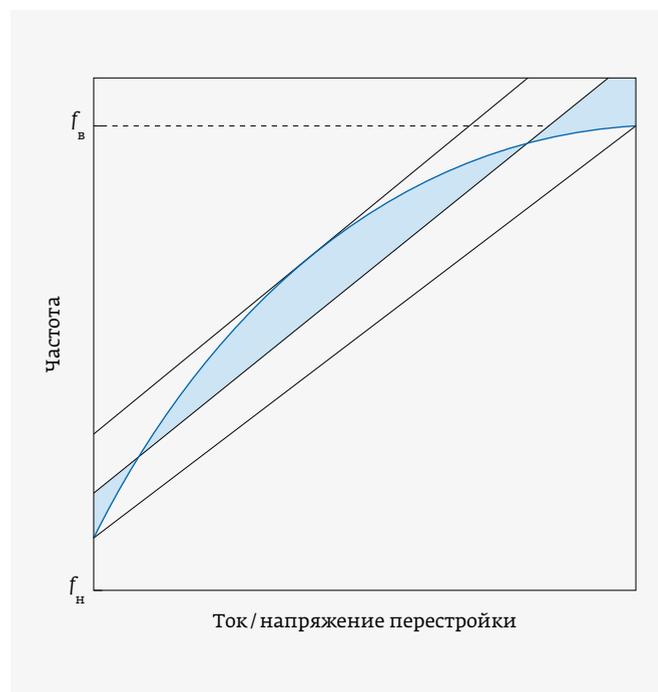


Рис. 15. Зависимость частоты ЖИГ-генератора от управляющего тока (напряжения)

классифицировать следующим образом: меньше октавы ( $f_{\text{в}}/f_{\text{н}} < 2$ ); октавные ( $f_{\text{в}} = 2f_{\text{н}}$ ); многооктавные ( $f_{\text{в}} > 2f_{\text{н}}$ ).

Крупнейшим производителем ЖИГ-генераторов является компания Micro Lambda Wireless. В линейке ее продукции есть ЖИГ-генераторы (серия MLPF), рассчитанные на фиксированные частоты 5, 7, 9, 13, 17 ГГц, специально разработанные для использования в синтезаторах фиксированных частот на кольцах ФАПЧ. Ряд изделий компания выпускает с перестройкой менее октавы: 4,6–8,9 ГГц (MLMY-1019X, MLMY-1179X), 8–12,4 ГГц (MLOM-0812), 11,6–13,9 ГГц (MLOM-1074X, MLOM-1495X).

Кроме того, компания производит несколько серий ЖИГ-генераторов, в которых перестройка относительно центральной частоты осуществляется в пределах  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 5$ ,  $\pm 6$  ГГц и более. Так, перестройка  $\pm 1$  ГГц реализуется в сериях MLPB (2–4, 3–5, 4–6, 5–7, 6–8 ГГц), MLPM и MLPC (4–6, 6–8, 8–10, 12–14, 16–18 ГГц). Перестройка  $\pm 2$  ГГц возможна в серии MLPW (8–12, 10–14, 14–18, 18–22 ГГц),  $\pm 4$  ГГц – в серии MLPX (16–24, 20–28, 28–36 ГГц), а  $\pm 5$  и  $\pm 6$  ГГц – в сериях MLXM, MLXB и MLXS. В отдельных изделиях реализуются перестройки  $\pm 1,5$  ГГц (MLMH-0306, MLMB-0306),  $\pm 3$  ГГц (MLMH-0208, MLLC-0208),  $\pm 5,5$  ГГц (MLVG-1021),  $\pm 8$  ГГц (MLOS-0218T),  $\pm 9$  ГГц (MLOS-0220T),

**Таблица 9.** Характеристики генераторов с переключаемыми сферами (компания Micro Lambda Wireless)

Модель	MLOS-0218T	MLOS-0220T	MLOS-0226T	MLXS-0218T	MLXS-0220T
Диапазон частот, ГГц	2–18	2–20	2–26,5	2–18	2–20
Выходная мощность, дБм	13	12	8	14	13
Температурный уход частоты, МГц, макс.	30	30	30	20	25
Линейность, %, макс.	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
Гистерезис, МГц, макс.	15	15	15	14	16
Уровень второй/третьей гармоники, дБн	-12/-12	-12/-12	-12/-12	-12/-15	-12/-15
Уровень негармонических составляющих, дБн	-60	-60	-60	-70	-70
Фазовый шум при отстройке 100 кГц, дБн/Гц в диапазоне частот:					
• 2–8 ГГц	-113	-113	-	-123	-123
• 8–18 ГГц	-105	-	-	-123	-123
• 8–20 ГГц	-	-103	-	-	-123
• 2–12 ГГц	-	-	-110	-	-
• 12–26,5 ГГц	-	-	-97	-	-
Точность стыковки поддиапазонов, МГц, макс.	8	10	10	8	10
Нижний поддиапазон, ГГц	2–8	2–8	2–12	2–8	2–8
Верхний поддиапазон, ГГц	8–18	8–20	12–26,5	8–18	8–20
Крутизна регулировочной характеристики в катушке:					
• грубой подстройки частоты, МГц/мА;	20 $\pm$ 5%	20 $\pm$ 5%	20 $\pm$ 5%	20	20
• точной подстройки частоты, кГц/мА	310	310	310	310	310

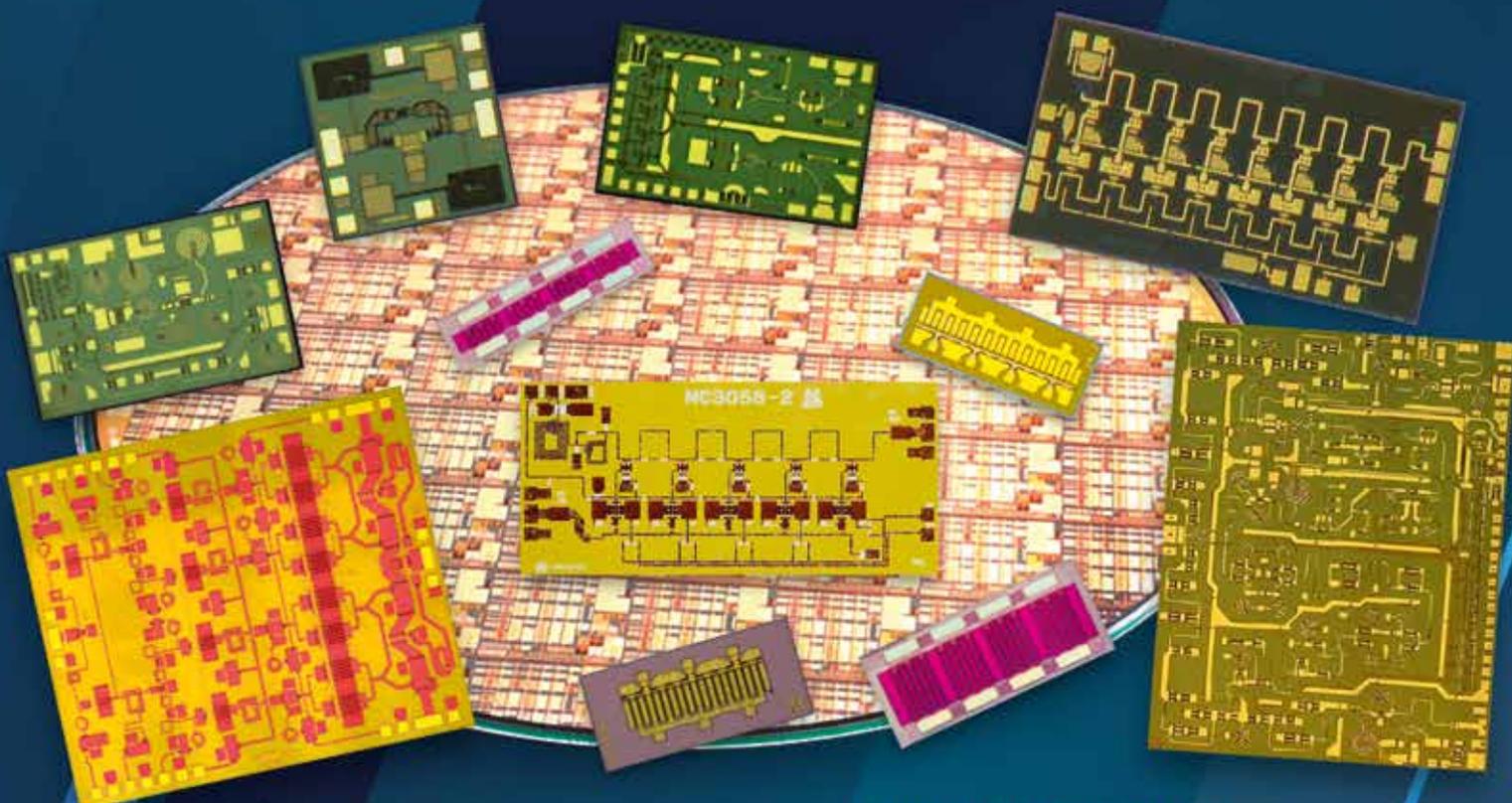


МИКРОВОЛНОВЫЕ  
СИСТЕМЫ

## ИНТЕЛЛЕКТ • КАЧЕСТВО НАДЕЖНОСТЬ

- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО СВЧ GaAs И GaN ТРАНЗИСТОРОВ, МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОМОДУЛЕЙ
- СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СВЧ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА
- НАИЛУЧШЕЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА / КАЧЕСТВО / СРОКИ

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СЕРТИФИЦИРОВАНА НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ИСО9001



### Область применения

- Широкополосная связь и телекоммуникации
- Контрольно-измерительные приборы
- Радиорелейная и спутниковая связь
- Специальная и космическая аппаратура
- Радиолинии «точка-точка», «точка-многоточка»

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»  
Москва, Щёлковское шоссе, д. 5, стр. 1  
Тел.: +7(499) 644-21-03  
e-mail: [mwsystems@mwsystems.ru](mailto:mwsystems@mwsystems.ru)  
[www.mwsystems.ru](http://www.mwsystems.ru)



Рис. 16. ЖИГ-генератор с умножителем частоты

$\pm 10$  ГГц (MLOS-2040) и  $\pm 11$  ГГц (MLOS-1840). Десятикратная (от 2 до 20 ГГц) перестройка обеспечивается в изделиях MLOS-0220T, MLXS-0220T, MLXS-0220, MLXB-0220. Еще большая (от 2 до 26 ГГц) перестройка достигается в ЖИГ-генераторе MLOS-0226T. Разработка ЖИГ-генераторов со столь значительными перестройками представляет собой весьма непростую задачу.

Одним из способов достижения большого перекрытия по частоте является использование в генераторе двух ЖИГ-сфер, подключаемых к активному элементу посредством pin-диодного переключателя. Каждая из сфер обеспечивает перекрытие своего поддиапазона частот. В двух изделиях (MLOS-0218T и MLOS-0220T) перекрытие в нижнем поддиапазоне частот составляет 2–8 ГГц, а в верхнем поддиапазоне частот – 8–18 ГГц и 8–20 ГГц. В третьем изделии этой серии (MLOS-0226T) поддиапазоны перестройки равны 2–12 ГГц и 12–26,5 ГГц. Точность стыковки поддиапазонов составляет 8 МГц для модели MLOS-0218T и 10 МГц для изделий MLOS-0220T и MLOS-0226T. Включенный после pin-переключателя усилитель обеспечивает выходную мощность в этих изделиях 13, 12 и 8 дБм соответственно. Генераторы выпускаются в цилиндрических корпусах с диаметром 2,0" и высотой 1,4". Фазовые шумы при отстройке 100 кГц в этих трех генераторах меняются от –113 дБн/Гц до –97 дБн/Гц (табл. 9). Существенно лучший уровень фазовых шумов (–123 дБн/Гц при отстройке 100 кГц) достигается в переключаемых генераторах MLXS-0218T и MLXS-0220T (рис. 7г), реализованных на биполярных SiGe-транзисторах (табл. 9). В этих генераторах к тому же обеспечивается несколько меньший уровень 3-й гармоники (–15 дБн вместо –12 дБн) и, что более существенно, уровень дискретных составляющих –70 дБн вместо –60 дБн.

Отметим также, что в ряде новых разработок (MLXB-0218, MLXS-0218, MLXB-0220 и MLXS-0220) удалось обеспечить 9- и 10-кратные перекрытия по частоте без режима переключения поддиапазонов. В этих ЖИГ-генераторах уровни второй и третьей гармоник равны соответственно –12 дБн и –15 дБн, уровень паразитных спектральных составляющих

составляет –70 дБн. Фазовые шумы при отстройке 100 кГц в диапазоне частот 2–12 ГГц равны –120 дБн/Гц, в диапазоне частот 12–18 ГГц равны –112 дБн/Гц и в диапазоне частот 18–20 ГГц составляют –107 дБн/Гц. Остальные характеристики этих генераторов практически совпадают с характеристиками переключаемых изделий (табл. 9).

У большинства производителей верхние частоты изделий обычно не превосходят 18,0–26,5 ГГц. Более высокочастотные ЖИГ-генераторы выпускает лишь компания Micro Lambda Wireless. В линейке ее продукции присутствуют две серии таких изделий. В одной из них представлены три модели – MLOS-1840 (18–40 ГГц), MLOS-2040 (20–40 ГГц) и MLOS-2640 (26,5–40 ГГц) – ЖИГ-генераторов в цилиндрических корпусах диаметром 2,00" и высотой 1,55". Изделия реализованы на электромагнитах с использованием арсенид-галлиевых полевых транзисторов. Фазовые шумы при отстройке 100 кГц в этих генераторах не превосходят –95 дБн/Гц.

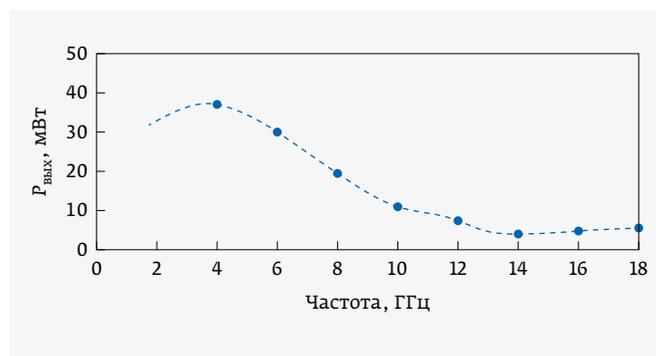
Альтернативное решение предполагает использование для расширения диапазона рабочих частот умножителя частоты (рис. 16). В качестве исходных ЖИГ-генераторов служат изделия серии MLPW. Реализуемые на общем металлическом основании изделия MLPX-1624, MLPX-2028, MLPX-2836 и MLPX-3644 обеспечивают выходные колебания в диапазонах частот 16–24, 20–28, 28–36 и 36–44 ГГц соответственно. Уровни 2-й и 3-й гармоник в этих изделиях не превосходят –20 дБн, а уровень паразитных спектральных составляющих менее –70 дБн. Фазовые шумы в этих моделях находятся в пределах –100...–94 дБн/Гц (табл. 10). Кратность умножения более двух реализуется в ЖИГ-генераторах YOM-103, YOM-104, YOM-102 и YOM-105 от компании OMNIYIG. Например, в изделии YOM-105 входит ЖИГ-генератор с перестройкой 1–2 ГГц, усилитель с выходной мощностью 0,5 Вт и ЖИГ-умножитель частоты. Гармоники основной частоты 1–2 ГГц выделяются следящим ЖИГ-фильтром в полосе частот 2–18 ГГц. Размещение фильтра и умножителя частоты в одном корпусе обеспечивает подавление гармонических и негармонических составляющих на уровне –60 дБн и ниже относительно колебания основной частоты. Выходная мощность ЖИГ-генератора с увеличением частоты заметно снижается (рис. 17). Габариты всего изделия за счет введения дополнительных модулей увеличиваются до 4,5" × 2,0" × 5,0".

Эффективным способом борьбы с гармоническими и негармоническими составляющими является применение следящих фильтров. Компания Micro Lambda Wireless выпускает две модели ЖИГ-генераторов этого типа для полосы частот 2–8 ГГц (MLOF-0208 и MLOF-2208). В первом из этих генераторов используется однозвенный фильтр, а во втором – двухзвенный. Фильтры настраиваются на частоту основной гармоники ЖИГ-генераторов или смещаются относительно нее на значение промежуточной частоты. В первом из

этих генераторов уровень 2-й и 3-й гармоник составляет  $-40$  дБн, а во втором  $-60$  дБн. В коммерческом исполнении рабочий диапазон температур равен  $0-65$  °С. При выполнении этих изделий по военным стандартам MIL-E-5400, MIL-E-16400 рабочий диапазон температур составляет  $-54...85$  °С. Линейность перестройки генератора достигает  $\pm 0,1\%$ .

Схожие изделия производит и компания OMNIYIG, которая использует двухзвенные следящие фильтры (генераторы M132YTO, M133YTO, M134YTO, M135YTO), трехзвенные фильтры (генераторы M136YTO, M137YTO, M138YTO, M139YTO), четырехзвенные фильтры (генераторы M140YTO, M141YTO, M142YTO, M143YTO), а также два последовательно включенных двухзвенных фильтра (генераторы M144YTO, M145YTO, M146YTO, M147YTO). Уровень второй гармоники в этих генераторах реализуется на уровне  $-40$  дБн и ниже. Уровень же паразитных спектральных составляющих в генераторах с четырехзвенным фильтром снижается до  $-80$  дБн.

Время переключения в стандартных ЖИГ-генераторах, выпускаемых компанией OMNIYIG, находится в пределах от 3 до 16 мс. Существенно, до 800 мкс, оно может быть снижено в ЖИГ-генераторах со следящими фильтрами (рис. 18). Эти изделия выпускаются для диапазонов  $0,5-2,0$ ,



**Рис. 17.** Зависимость выходной мощности от частоты колебаний в ЖИГ-генераторе YOM-105 (компания OMNIYIG)

$2-8$ ,  $8-18$  и  $2-18$  ГГц. ЖИГ-генераторы с такими диапазонами перестройки могут быть реализованы с применением двухзвенных следящих фильтров (M148YTOF, M149YTOF, M150YTOF, M151YTOF), четырехзвенных следящих фильтров (M129YTOF, M120YTOF, M121YTOF, M152YTOF) и двух последовательно включенных двухзвенных фильтров (M153YTOF, M154YTOF, M155YTOF, M156YTOF). Следящие

**Таблица 10.** Характеристики ЖИГ-генераторов (серия MLPX, компания MLW) с удвоением частоты

Модель	MLPX-1624	MLPX-2028	MLPX-2836	MLPX-3644
Диапазон частот, ГГц	16-24	20-28	28-36	36-44
Частота генерации без включения грубой подстройки, ГГц	20	24	32	40
Выходная мощность, дБм	10	8	8	8
Температурный уход частоты, МГц	40	40	40	40
Линейность, МГц	10	10	10	10
Гистерезис, МГц	4	4	4	4
Уровень гармоник, дБн	-20	-20	-20	-20
Уровень негармонических составляющих, дБн	-70	-70	-70	-70
Фазовые шумы при отстройке 100 кГц, дБн/Гц	-100	-100	-99	-94
Крутизна регулировочной характеристики в катушке:				
• грубой подстройки, МГц/мА;	28	28	20	20
• точной подстройки, кГц/мА	620	620	620	620
Напряжение на термостате, В	+15	+15	+15	+15
Ток, мА:				
• в режиме разогрева;	250	250	250	250
• в стационарном режиме	50	50	50	50

фильтры имеют вносимые потери от 5 до 7 дБ и полосы по уровню 3 дБ 15–30 МГц в диапазоне частот 0,5–2,0 ГГц, 24–45 МГц в диапазоне 2–8 ГГц, 25–45 МГц в диапазоне 8–18 ГГц и 20–50 МГц в диапазоне 2–18 ГГц. Расхождения частот генерируемых колебаний и частот настройки следящих фильтров находятся в пределах  $\pm 5... \pm 9$  МГц.

Меньшие значения времени переключения реализуются в ряде других моделей компании OMNIVIG: 500 мкс (YOM2789, YOM2781), 400 мкс (YOM2980, YOM2981), 100 мкс (YOM2776, YOM2777, YOM2778, YOM2779), 80 мкс (YOM2979) и 70 мкс (YOM2977, YOM2978).

Высокая скорость перестройки обеспечивается также в ЖИГ-генераторах серии MLMH, выпускаемых компанией Micro Lambda Wireless. Эти генераторы перестраиваются в диапазонах частот 2–4 ГГц (MLMH-0204), 3–6 ГГц (MLMH-0306), 4–8 ГГц (MLMH-0408) и 2–8 ГГц (MLMH-0208). При использовании стандартного аналогового драйвера с напряжениями питания +24 и –15 В скорость перестройки в диапазоне частот 2–8 ГГц (MLMH-0208) составляет 80 мкс/ГГц с точностью  $\pm 10$  МГц. При напряжениях питания драйвера +15 В и –15 В скорость перестройки возрастет до 100 мкс/ГГц при той же точности. В пять раз меньшее время перестройки по сравнению со стандартными ЖИГ-генераторами обеспечивается в трех моделях (серия FTO) компании Giga-tronics (табл. 7): FTO-0307-540-01 (3–7 ГГц), FTO-0408-540-01 (4–8 ГГц) и FTO-0410-540-01 (4–10 ГГц).

В значительной степени характеристики ЖИГ-генераторов зависят от тщательности разработки и изготовления аналоговых и цифровых драйверов, обеспечивающих формирование необходимых напряжений и кодов. Среди характеристик генераторов, на которые оказывает влияние качество исполнения драйверов, можно назвать: шумовые свойства генератора (остаточная частотная модуляция (ЧМ)), время его перестройки, линейность, температурный уход частоты и точность ее установки. Часть этих характеристик определяется стабильностью

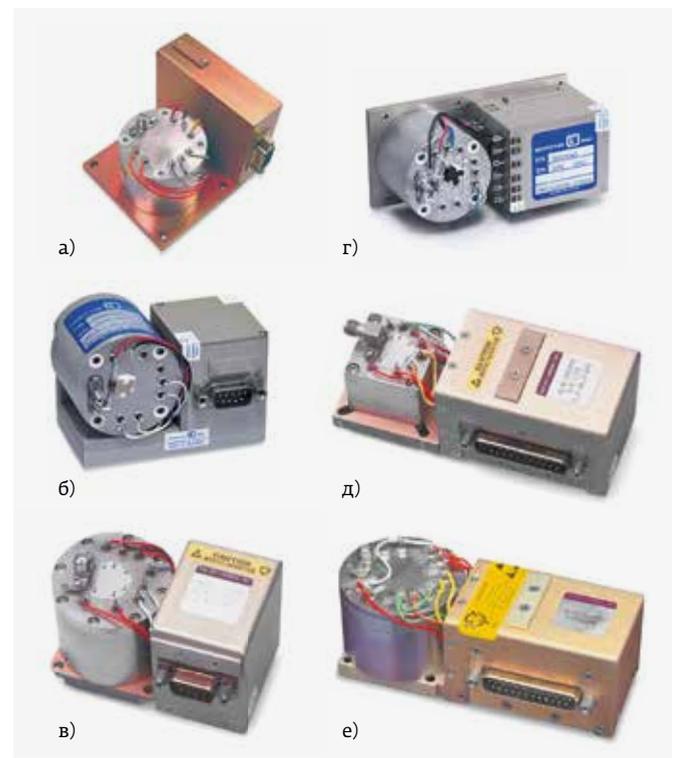


**Рис. 18.** ЖИГ-генератор со следящим ЖИГ-фильтром, обеспечивающий малое (800 мкс) время переключения

характеристик используемых компонентов в диапазоне рабочих температур. Шумовые свойства и время переключения частоты зависят от уровня остаточной ЧМ. Стандартные значения времени перестройки частоты (10–20 мс) обеспечиваются при остаточной ЧМ 50–100 кГц (peak-to-peak). Снижение этого показателя до 25 кГц (peak-to-peak) положительно сказывается на шумах генератора, но увеличивает почти на порядок время перестройки. В силу достаточно сложных требований, предъявляемых к драйверам, они чаще всего разрабатываются и производятся изготовителями ЖИГ-генераторов.

Драйверы могут быть как аналоговыми, так и цифровыми (рис. 19). В аналоговых драйверах, как правило, формируется напряжение, меняющееся от 0 до +10 В. В цифровых драйверах формируются последовательный или параллельный коды [14]. В изделиях компании Micro Lambda Wireless разрядность последовательного кода равна 16 бит, а параллельный код формируется с числом разрядов 12, 14 и 16 бит. О размерах ЖИГ-генераторов с подключенными к ним драйверами можно судить по чертежам (рис. 20), на которых все размеры указаны в дюймах.

Особенно большими размеры оказываются в случае, когда к ЖИГ-генератору и следящему ЖИГ-фильтру подключаются два драйвера, обеспечивающие управление



**Рис. 19.** ЖИГ-генераторы с аналоговыми (а, б, в) и цифровыми (г, д, е) драйверами

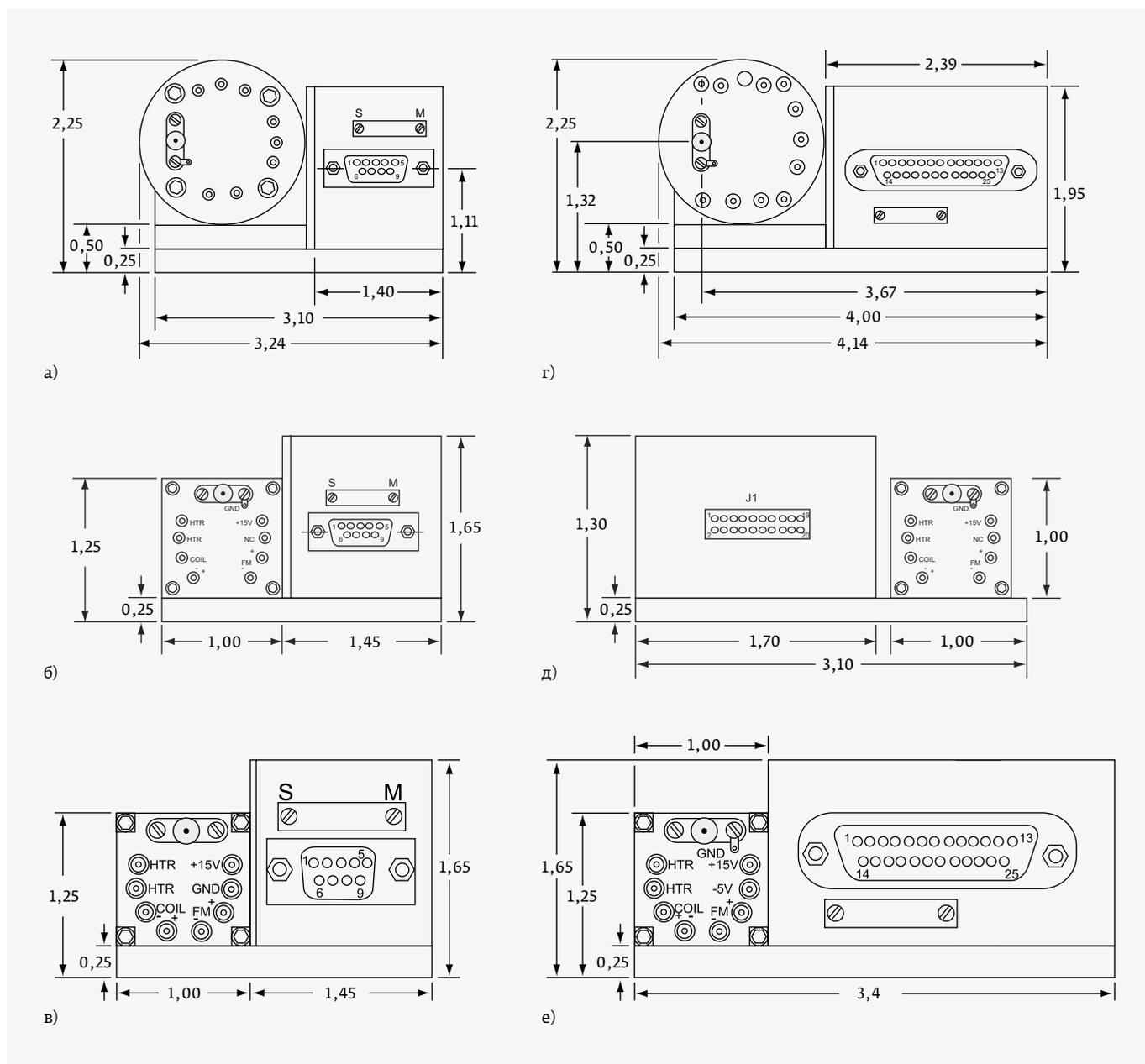


Рис. 20. Габаритные размеры (в дюймах) ЖИГ-генераторов с аналоговыми (а, б, в) и цифровыми (г, д, е) драйверами

Рис. 21. ЖИГ-генератор М141УТО со следящим ЖИГ-фильтром с подключенными драйверами



Таблица 11. Характеристики ЖИГ-генераторов российских производителей

Компания	ННИПИ «Кварц»			АО «НИИ «Феррит-Домен»				«Микран»	
	2.210.137	434.811.030	434.811.080	ФКГН3-1	ФКГН3-2	ФКГН3-3	ФКГН2-5	ФКГН2-8	МУТО-3080
Диапазон частот, ГГц	2-8	8-20	1,0-4,5	1,00-2,15	2-4	1-4	2-8	8-16	3-8
Выходная мощность, мВт	15	15	10	15	20	10	10	5	12 дБм
Линейность, ± МГц	15	20	10	-3...10	-9...12	-9...12	-30...20	-50...50	-
Вторая гармоника, дБн	-10	-10	-8	-	-	-	-	-	-8
Негармонические составляющие, дБн	-60	-60	-60	-	-	-	-	-	-
Фазовые шумы при отстройке 100 кГц, дБн/Гц	-	-	-	-	-	-	-	-	125
Крутизна регулировочной характеристики в катушке:									
• грубой подстройки, МГц/мА;	20±2	30±3	18±2	-	-	-	-	-	10
• точной подстройки, кГц/мА	200	200	200	-	-	-	-	-	200

Таблица 12. Характеристики ЖИГ-генераторов китайских производителей

Компания	CETC 41st						China Electronics Technology Instruments	
	AV16103	AV86201	AV86202	AV16107	AV82607	AV86203	86207	86203A
Диапазон частот, ГГц	2,2-8,0	2,2-20,0	3-9	8-20	3-7	3-10	3-8	3,2-10,0
Выходная мощность, дБм	13	12	14	12	14	14	12	12
Линейность, %	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
Уровень гармоник, дБн	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-8	-8
Негармонические составляющие, дБн	-60	-60	-70	-60	-70	-70	-70	-70
Фазовые шумы при отстройке 100 кГц, дБн/Гц	-112	-100	-120	-100	-118	-118	-118	-118
Крутизна регулировочной характеристики в катушке:								
• грубой подстройки, МГц/мА;	20±1	60±3	20±1	60±3	20±1	20±1	20±1	20±1
• точной подстройки, кГц/мА	300	230	210	300	210	220	210	260

этим ЖИГ-изделиями (рис. 21). Так, в состав изделия M14YUO, выпускаемого компанией OMNIYIG, входят собственно ЖИГ-генератор, 4-звенный следящий ЖИГ-фильтр и два драйвера, которые могут быть как аналоговыми, так и цифровыми. Это сложное изделие имеет габариты 1,65" × 3,40" × 3,70" и обеспечивает генерацию колебаний в диапазоне частот 2–8 ГГц при выходной мощности более 13 дБм и шумах –120 дБн / Гц при отстройке от несущей на 100 кГц.

Важным элементом большинства ЖИГ-генераторов является термостат, обеспечивающий постоянную температуру резонаторной части генератора. На основании опубликованных технических описаний можно заключить, что все изделия компании OMNIYIG содержат элементы термостатирования. В стационарном режиме напряжение, подаваемое на термостат, составляет 18–30 В, а потребляемый ток в различных моделях меняется от 50 до 150 мА. В технических описаниях ЖИГ-генераторов компании Micro Lambda Wireless приводятся сведения о токах в стационарном режиме и в режиме нагрева. В большинстве выпускаемых этой компанией ЖИГ-генераторов напряжение термостата находится в границах 20–28 В, а потребляемые токи составляют 20–25 мА в стационарном режиме и 200–250 мА в режиме нагрева. В некоторых недавно выпущенных сериях (MLOF, MLOB) генераторов при термостатировании используются двуполярные напряжения.

В двух сериях (MLSMO и MLVG) этой компании нагревательные элементы вообще отсутствуют.

В завершение можно констатировать, что наиболее крупными производителями ЖИГ-генераторов являются компании Micro Lambda Wireless, OMNIYIG и Teledyne Microwave Solutions. Для ряда других компаний (Raditek, Zik, Filtronic Solid State и др.) эта деятельность является непрофильной. В Российской Федерации ЖИГ-генераторы производят НИИПИ «Кварц», АО «НИИ «Феррит-Домен» и компания «Микран» (табл. 11). Определенных успехов в этой деятельности в последнее время добились и китайские производители (табл. 12).

## ЛИТЕРАТУРА

10. PCB-Mounted, YIG Sources // Microwave J., Jan. 1996.
11. Experimenting with a Stellex YIG Oscillators. – Stellex (Endwave/Microsemi) Products PP. 55–64.
12. Mini & Micro YIG Oscillators // Microwave J., Jan. 17, 2011.
13. Differential Resonant Ring Oscillator Utilizing Magnetically Tuned YIG Resonators to Achieve ultra Low Phase Noise and Multi-octave Electronic Tuning in Microwave Frequencies. R. A. Parrott, A. A. Sweet. Патент США, № 8.350.629B2, Jan. 8, 2013.
14. Standard oscillator, filter and multiplier driver adjustment procedure. – Micro Lambda Wireless. Document № 201.202. PP. 1–11.

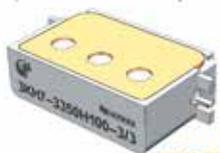
# Качество высокое Цены низкие

Любые виды заказов:  
• СЧОКР • срочные заказы  
• единичные/крупносерийные заказы

[www.filin-rf.ru](http://www.filin-rf.ru)  
**ФИЛИН**  
Filter Innovations  
[www.radiocomp.ru](http://www.radiocomp.ru)  
[filin-rf@radiocomp.ru](mailto:filin-rf@radiocomp.ru)

Фильтры на коаксиально-керамических резонаторах

Диапазон частот, МГц	Полоса пропускания, %	КСВН в полосе пропускания	Гарантированное затухание, дБ	Вносимые потери в полосе пропускания, дБ
300 – 4000	0,5...25	1,5 – 2,0	Определяется отстройкой от номинальной частоты и порядком фильтра	Зависят от порядка фильтра



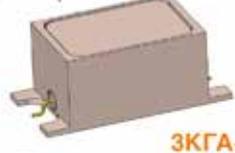
**3КН7-3350Н100-3/3**

- ПФ 3 порядка
- Номинальная частота 3350 МГц
- Сверхмалые габариты
- Под поверхностный монтаж



**5КГИ-1049П10-Б/Б**

- ПФ 5 порядка
- Номинальная частота 1049 МГц
- Герметичный корпус
- SMA-соединители



**3КГА-5950П300-8/8**

- ПФ 3 порядка
- Номинальная частота 5950 МГц
- Герметичный корпус
- Под поверхностный монтаж

109316, Москва, Волгоградский проспект, 42 +7 495 020 4000 / +7 495 95 777 45

№6 (00227) 2023

ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА | ТЕХНОЛОГИЯ | БИЗНЕС 89