ТЕРМОСТАТИРОВАННЫЙ КВАРЦЕВЫЙ ГЕНЕРАТОР 80–130 МГц ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

А.О. Ложников, В.И. Карагусов, А.В. Розанова

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Представлены результаты разработки технического проекта прецизионного термостатированного кварцевого генератора на частоты 80–130 МГц, предназначенного для замещения генераторов зарубежного производства в области космических применений. Обоснован выбор технических решений, освещены результаты измерений электрических параметров макетных образцов. Рассмотрены вопросы прочности конструкции к воздействию жёстких механических внешних воздействующих факторов и стойкости генератора к воздействию специальных факторов, таких как космические излучения.

Ключевые слова: кварцевый генератор, термостатированный кварцевый генератор, ТСКГ, кварцевый резонатор-термостат, пьезоэлемент.

OVEN CONTROLLED 80–130 MHZ QUARTZ CRYSTAL OSCILLATOR FOR SPACE-RELATED APPLICATIONS

A.O. Lozhnikov, V.I. Karagusov, A.V. Rozanova

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

The results of the development of a technical design for a precision thermostated quartz oscillator at a frequency of 80–130 MHz, intended to replace foreign-made generators in the field of space applications, are presented. The choice of technical solutions is justified, the results of measurements of the electrical parameters of prototypes are covered. The issues of structural strength to the effects of rigid mechanical external factors and the resistance of the generator to the effects of special factors such as cosmic radiation are considered.

Keywords: crystal-controlled oscillator, thermostatically controlled quartz oscillator, OSQO, quartz resonator-thermostat, piezoelectric element.

Введение

Высокие требования, предъявляемые в настоящее время к навигационным системам, системам радиосвязи и передаче данных, обуславливают применение в них опорных генераторов с высокими показателями по целому ряду параметров: компактность, низкое энергопотребление, высокая долговременная и кратковременная стабильность частоты, малое время выхода на режим, низкий уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов, высокая стабильность частоты при воздействии различных внешних воздействующих факторов, таких, например, как изменение температуры окружающей среды, вибрация, одиночные и многократные удары [1].

Опытно-конструкторская работа выполняется в рамках импортозамещения в области высоких технологий и в космической отрасли, имеет своей целью создание прецизионного высокостабильного и высоконадёжного термостатированного кварцевого генератора (ТСКГ) на частоты 80–130 МГц. Проектируемый генератор предназначен для применения в: устройствах формирования опорного сигнала для синхронизации частот радиоприёмных, радиопередающих устройств и систем связи, в том числе для космических применений.

Анализ требований, предъявляемых к генератору

В табл. 1 представлены требования к техническим характеристикам разрабатываемого генератора, предъявляемые ТЗ.

Таблица 1

Требования к техническим характеристикам генератора

<i>Параметр</i>	<i>Требование ТЗ</i>
Диапазон частот, МГц	80...130
Сопротивление нагрузки, Ом	50±5
Уровень выходного напряжения (эффективное значение) на нагрузке (50±5) Ом, В	Синус, 0,25±0,05
Относительное начальное отклонение частоты от номинала при +25 °С, ppm, не более	±0,2
Допускаемое относительное изменение частоты генератора кварцевого от воздействия дестабилизирующих факторов, не более (относительная температурная нестабильность частоты в диапазоне рабочих температур, при изменении напряжения питания, при изменении сопротивления нагрузки)	±2·10 ⁻⁷
Относительная долговременная нестабильность частоты за полгода, ppm	±4·10 ⁻⁸
за год, ppm	±8·10 ⁻⁸
за 15 лет	±1·10 ⁻⁶
Напряжение питания, В	12,0±0,6
Потребляемая мощность:	
В режиме разогрева, Вт, не более	2,5
В установившемся режиме, Вт, не более	0,45
Диапазон рабочих температур, °С	-30...65
Диапазон температуры хранения, °С	-60...70
Время установления частоты генератора относительно установившегося значения через 1 час после включения с погрешностью ±5·10 ⁻⁷	10
Уровень СПМ фазовых шумов при отстройке, дБн/Гц:	
10 Гц	-90
100 Гц	-115
1000 Гц	-140
10000 Гц	-150
Уровень субгармонических составляющих, дБ, не более	-30...-40
Относительное изменение частоты генератора кварцевого при ее коррекции напряжением от 0 до 8 В, не менее	±0,9·10 ⁻⁶
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	37х28х16
Вес, г, не более	40*
Исполнение, герметичность	Выводное, герм.

Также к генератору предъявляются жесткие требования к прочности при воздействии механических внешних воздействующих факторов (одиночные удары – до 2500 г, широкополосная случайная вибрация – до 19 г) и стойкости к космическим излучениям.

В ходе анализа выявлено, что отечественные модели генераторов, обладающие данными техническими характеристиками, на рынке не представлены.

Конструкция генератора

На рис. 1 представлена функциональная схема термостатированного кварцевого-генератора. Генератор состоит из автогенератора, кварцевого резонатора-термостата (КРТ), буферного усилителя, схемы терморегулирования для КРТ и стабилизатора напряжения, питающего все узлы генератора.

Анализ требований к параметрам генератора показал, что в конструкции необходимо применение пьезоэлемента БТ-среза на частоты 43...87 МГц, работающего на пятой механической гармонике, и автогенератора с удвоением частоты. При разработке конструкции резонатора-термостата (РТ) и генератора использован опыт разработки генераторов с высокими требованиями к прочности и стойкости к воздействию механических и специальных

воздействующих факторов. В конструкции генератора применены отечественные электрорадиоизделия (ЭРИ) и материалы, имеющие высокую стойкость к специальным факторам. Так, применение в качестве материала пьезоэлемента электроочищенного пьезокварца позволяет иметь высокую стабильность частоты при воздействии ионизирующих излучений [2].

Рис. 1. Функциональная схема ТСКГ с выходной частотой 80...130 МГц

На рис. 2 изображена конструкция компактного РТ, имеющая высокую прочность к внешним механическим воздействиям. Элементы конструкции резонатора защищены патентом на полезную модель [3]. Микроплата с нагревателем из поликора с установленным на ней транзистором нагревателем крепится к снованию корпуса РТ при помощи 4 прочных теплоизолирующих держателей из нихрома. На микроплату при помощи держателей установлен типовой прямоугольный пьезоэлемент БТ-среза длиной 10 и шириной 7 мм, косвенный подогрев которого осуществляется от микроплаты как через металлические держатели, так и посредством теплового излучения, доля которого в теплообмене может достигать 80 % [4]. Конструкции резонаторов-термостатов с косвенным подогревом пьезоэлемента широко описаны в литературе, например в [5; 6]. На основание при помощи лазерной сварки по контуру устанавливается крышка. Внутри корпуса создается вакуум для теплоизоляции внутренних элементов конструкции от окружающей среды и стабильности свойств резонатора.

Рис. 2. Микроплата резонатора-термостата с установленными на ней держателями и пьезоэлементом и резонатор-термостат в сборе (крышка не установлена)

Радиокомпоненты всех функциональных узлов генератора, включая КРТ, установлены на печатный узел (рис. 3). Применение SMD-компонентов позволяет обеспечить высокую плотность и компактность размещения элементов схемы.

Рис. 3. Внешний вид печатного узла

Печатный узел устанавливается при использовании резинового амортизатора сложной формы в металлический корпус формата Euro-rack (рис. 4). Такое техническое решение обеспечивает требуемую высокую прочность изделия к воздействию ударов и вибраций.

Рис. 4. Внешний вид макетного образца генератора

Конструкция генератора в разрезе показана на рис. 5.

Рис. 5. Продольный разрез генератора в сборе

Измерения электрических параметров генератора

Макеты генератора разработанной конструкции были подвергнуты лабораторным измерениям электрических параметров. На рис. 6 показан частотно-временной график установления частоты генератора при включении, записанный при помощи аппаратно-программного комплекса Pendulum CNT-91 / TimeView 3.0. На графике видно, что время установления частоты с точностью $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ относительно установившегося значения составило 137 с, или 2,3 мин, при требовании ТЗ не более 10 мин.

Рис. 6. Установление частоты при включении генератора с терморегулятором представленной конструкции

На рис. 7 и 8 приведены результаты измерений относительной спектральной плотности мощности фазовых шумов макета генератора на 86,99218 МГц и макета на 123,51562 МГц.

Рис. 7. Измеренный уровень СПМ фазовых шумов макета на 86,99218 МГц

Рис. 8. Измеренный уровень СПМ фазовых шумов макета на 123,51562 МГц

Результаты измерений фазовых шумов, представленных на рис. 7 и 8, сведены в табл. 2 и приведены в сравнении с требованиями ТЗ.

Таблица 2
Соответствие результатов измерений уровня СПМ фазовых шумов требованиям ТЗ

Относительная спектральная плотность мощности фазовых шумов при отстройках от несущей Δf , дБ/Гц	Измеренное значение макета на 86,99218 МГц	Измеренное значение макета на 123,51562 МГц	Норма параметра по ТЗ, не более
10 Гц	-97,71	-93,50	-90
100 Гц	-131,21	-120,20	-115
1000 Гц	-155,42	-148,11	-140
10000 Гц	-159,56	-156,37	-150

Как видно из данных, представленных в табл. 2, уровень СПМ фазовых шумов макетов на 86,99218 МГц и на 123,51562 МГц удовлетворяют требованиям ТЗ.

На рис. 9 представлены результаты измерений спектра выходных колебаний макетов на 86,99218 МГц и на 123,51562 МГц.

Рис. 9. Измерения спектра выходного сигнала макетов на 86,99218 и 123,51562 МГц

Измеренное значение уровня выходного сигнала первого макета составило 3,717 дБм на нагрузке 50 Ом, измеренное значение уровня субгармоники –49,699 дБм, следовательно, уровень субгармонической составляющей относительно основной частоты составляет –53,416. Измеренное значение уровня выходного сигнала второго макета составило 3,459 дБм на нагрузке 50 Ом, измеренное значение уровня субгармоники составило –40,653 дБм, следовательно, уровень субгармонической составляющей относительно основной частоты составляет –44,112 дБн. Величина уровня подавления субгармонической составляющей выходного сигнала обоих макетов значительно превосходит требование ТЗ – не более –30 дБн.

Выходные частоты макетов близки к границам диапазона рабочих частот, определённым ТЗ, что подтверждает соответствие параметров требованиям для генератора любой частоты заданного диапазона. Результаты измерений уровня выходного сигнала генераторов и потребляемой ими мощности в режиме начального разогрева и в установившемся режиме также соответствуют требованиям ТЗ.

Заключение

В результате выполнения 1-го этапа составной части опытно-конструкторской работы «Разработка кварцевых», шифр: «Кварц-100», разработан технический проект. В ходе выполнения работ:

- 1) проанализированы требования ТЗ к электрическим параметрам разрабатываемого генератора, параметрам стойкости и прочности к воздействию внешних воздействующих факторов и технические характеристики генератора-аналога;
- 2) на основе анализа выбраны и обоснованы технические решения по схемотехнике функциональных узлов генератора, конструкции пьезоэлемента, резонатора-термостата и конструкции генератора в целом, обоснован выбор ПКИ и материалов;
- 3) проведены расчёты функциональных узлов генератора;
- 4) изготовлены макетные образцы генераторов с выходной частотой 100 МГц, 86,99218 МГц и 123,51562 МГц.

Проведенные лабораторные испытания макетов генераторов с выходной частотой 100 МГц, 86,99218 МГц и 123,51562 МГц показали соответствие основных электрических параметров разрабатываемого генератора требованиям технического задания и возможность создания отечественного аналога зарубежного генератора для космических применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vig J.R.* Military Applications of High Accuracy Frequency Standards and Clocks // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1993. Vol. 40, pp. 522–527.
2. *Vig J.R.* Quartz Crystal Resonators and Oscillators for Frequency Control and Timing Applications – A Tutorial, US Army Communications-Electronic Research, Development & Engineering Center, Fort Monmouth, N. J., USA, 2004.
3. Миниатюрный кварцевый резонатор-термостат: патент на полезную модель 128042 Российская Федерация, МПК H03H3/00 / Бахтинов В.В., Ермоленко С.В., Ярош А.М.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ОНИИП». № 2012136182, заявл. 22.08.2012, опубл. 10.05.2013.
4. *Карагузов В.И.* Уточнение модели электротепловой аналогии для расчёта кварцевых резонаторов-термостатов с распределённым нагревателем // *Техника радиосвязи*. 2017. Вып. 2 (33). С. 96–104.
5. *Abramzon I., Tapkov V.* Utmost OCXO Solutions Based on the IHR Technology // *Microwave Journal*. 2014. Vol. 57, no. 4. С. 96–100.
6. *Куталёв А.И., Карагузов В.И.* Высокостабильный кварцевый генератор для бортовой аппаратуры // *Радиотехника, электроника и связь (РЭИС-2011)*: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Омск, 2011. С. 535–540.