

А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КВАРЦЕВОГО КАЛИБРАТОРА**

Объектом исследования является калибратор, состоящий из кварцевого генератора и генератора гармоник на диоде с накоплением заряда. Целью исследования является выявление технических параметров и характеристик калибратора, отсутствующих в литературе. Проведено экспериментальное исследование кварцевого калибратора с сеткой частот через 50 МГц. Представлены следующие результаты: – выбег частоты за 20 минут после включения; – зависимость частоты первой гармоники от напряжения питания; – спектр гармоник в полосе частот от 0 до 1500 МГц. Даны принципиальная схема и краткое описание конструкции. Приведено фото и методика эксперимента. Калибратор рекомендуется использовать в приёмниках и анализаторах спектра для проверки их работоспособности и повышения точности настройки. Достигнуты следующие электрические параметры: – точность установки частоты первой гармоники  $\pm 2,5$  кГц; – мощность первой гармоники 0 дБм; – неравномерность гармоник в полосе от 0 до 1500 МГц не более 36 дБ; – выбег частоты первой гармоники за 20 минут 34 Гц; – уход частоты первой гармоники при изменении напряжения питания от 5 до 13,5 В не более 288 Гц; – ширина спектральной линии на уровне минус 40 дБ от максимума не более 4 Гц. Сравнение полученных результатов с известными показывает достаточно большую неравномерность мощности гармоник в диапазоне частот до 1500 МГц. Уменьшение неравномерности мощности гармоник можно достичь несколькими путями: – дополнить калибратор корректором амплитудно-частотной характеристики; – увеличить частоту первой гармоники. Преимуществами данного калибратора являются простота схемы и конструкции, возможность повторения в условиях серийного производства, доступность элементной базы, простота настройки, малые масса и габариты. Используя более мощные транзисторы, можно перекрыть не только дециметровый, но и сантиметровый диапазон длин волн.

Калибратор; генератор гармоник; диод с накоплением заряда; спектр гармоник; неравномерность выходной мощности; схема; конструкция; эксперимент.

A.N. Zikiy, A.S. Kochubey

**EXPERIMENTAL STUDY OF QUARTZ CALIBRATOR**

The object of research is a calibrator consisting of a quartz oscillator and a diode-based harmonic generator with charge accumulation. The aim of the study is to identify technical parameters and characteristics of the calibrator that are absent in the literature. An experimental study of a quartz calibrator with a frequency grid at 50 MHz has been carried out. The following results are presented: – overrun frequency 20 minutes after switching on; – dependence of the frequency of the first harmonic on the supply voltage; – spectrum of harmonics in the frequency range from 0 to 1500 MHz. A schematic diagram and a brief description of the design are given. A photo and experimental technique are presented. The calibrator is recommended for use in receivers and spectrum analyzers to test their performance and improve tuning accuracy. The following electrical parameters have been achieved: – frequency setting accuracy of the first harmonic  $\pm 2.5$  kHz; – power of the first harmonic 0 dBm; – non-uniformity of harmonics in the band from 0 to 1500 MHz no more than 36 dB; – run-out of the frequency of the first harmonic in 20 minutes 34 Hz; – frequency drift of the first harmonic when the supply voltage changes from 5 to 13.5 V, no more than 288 Hz; – the width of the spectral line at the level of minus 40 dB from the maximum is not more than 4 Hz. Comparison of the obtained results with the known ones shows a rather large unevenness of the harmonic power in the frequency range up to 1500 MHz. Reducing the uneven power of harmonics can be achieved in several ways: – supplement the calibrator with a corrector of the amplitude-frequency characteristic; – increase the frequency of the first har-

*monic. The advantages of this calibrator are the simplicity of the circuit and design, the possibility of repetition in the conditions of serial production, the availability of the element base, ease of adjustment, small weight and dimensions. Using more powerful transistors, it is possible to cover not only the decimeter, but also the centimeter wavelength range.*

*Calibrator; harmonic generator; diode with charge accumulation; spectrum of harmonics; uneven output power; circuit; design; experiment.*

**Введение.** В ряде радиоприёмных устройств и анализаторов спектра для обеспечения высокой точности установки частоты настройки используется встроенный кварцевый калибратор. К таким приборам относится анализатор спектра типа С4-60 [1].

Калибратор представляет собой кварцевый генератор и генератор гармоник.

Генераторы гармоник и умножители частоты нашли широкое применение в измерительной и приемо-передающих технике. Их описанию и исследованию посвящено значительное число работ, в том числе монографии [2–13], учебное пособие [14], статьи [15–18], диссертации [19].

В монографиях [2–13] показано, что варакторы и диоды с накоплением заряда используют преимущественно в выходных каскадах генераторов гармоник и умножителей частоты, а предварительные усилители и задающие генераторы строят на транзисторах и микросхемах. В учебном пособии [14] рассмотрена схемотехника кварцевых генераторов, дана методика их расчёта.

Объектом исследования является калибратор из состава прибора С4-60. Целью исследования является измерение параметров калибратора, не описанных в техническом описании [1].

Основные параметры калибратора следующие:

- ◆ диапазон рабочих частот 50–1500 МГц;
- ◆ первая гармоника 50 МГц;
- ◆ отклонения первой гармоники от 50 МГц не более  $\pm 10$  кГц;
- ◆ напряжение питания + 12,6 В;
- ◆ сопротивление нагрузки 50 Ом.

**Схема и конструкция.** Калибратор состоит из кварцевого генератора 50 МГц, эмиттерного повторителя, усилителя и генератора гармоник, что представлено на рис. 1. Кварцевый генератор работает по схеме автогенератора с кварцем в цепи обратной связи. Подстройка частоты генератора производится сердечником катушки индуктивности L1. Сигнал с кварцевого генератора через эмиттерный повторитель и усилитель поступает на генератор гармоник. Генератор гармоник состоит из диода с накоплением заряда и цепочек смещения. Из синусоидального напряжения диодом формируется последовательность импульсов малой длительности, спектр которых содержит большое число медленно убывающих по амплитуде гармоник, частота которых кратна 50 МГц. Частота основной гармоники кварцевого калибратора отличается от 50 МГц не более чем на  $\pm 10$  кГц.

Почти все детали калибратора размещены на печатной плате из стеклотекстолита размером 80x58x1,5 мм. Плата закреплена четырьмя стойками в корпусе чашечного типа и закрыта крышкой. Фото калибратора со снятой крышкой можно видеть на рис. 2.

В калибраторе применены следующие детали:

- ◆ транзистор Т1, Т2 – типа 2Т306В;
- ◆ транзисторы Т3, Т4 – типа 2Т371А;
- ◆ постоянные резисторы типа ОМЛТ – 0,125;
- ◆ конденсаторы типа КД и КМ-56;
- ◆ катушка индуктивности L1 типа К0-III-0,12 мкГн;

- ◆ катушка индуктивности L2 бескаркасная 4 витка посеребрённым проводом 1 мм (на оправке 8 мм);
- ◆ резонатор типа РГ-05-14БР-50 МГц-МЗ-У;
- ◆ умножительный диод 2А609Б [20].

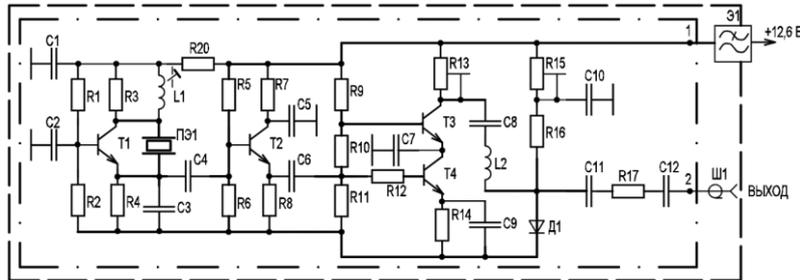


Рис. 1. Принципиальная схема калибратора



Рис. 2. Фото калибратора со снятой крышкой

**Эксперимент.** Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 3: В этом эксперименте получен спектр выходного сигнала в полосе от 0 до 1500 МГц (рис. 4). Из рисунка 4 видно, что неравномерность гармоник составляет 36 дБ. При этом первая гармоника имеет мощность 0 дБм, третья гармоника имеет мощность минус 34 дБм.

Во втором эксперименте проводилось измерение выбега частоты за 20 минут после включения. Результаты измерений с интервалом 2 минуты заносились в табл. 1. По данным табл. 1 построен график на рисунке 5, из которого видно, что максимальный выбег частоты составил 34 Гц. Измерения проведены при параметрах анализатора спектра SPAN = 1 кГц и BW = 4.7 Гц.

В третьем эксперименте снималась зависимость частоты первой гармоники от напряжения питания. Напряжение питания изменялось в пределах от 5 до 13,5 В с шагом 0,5 В. Результаты измерений заносились в табл. 2. По данным табл. 2 построен график на рис. 6, из которого видно, что уход частоты составил около 0,288 кГц.



Рис. 3. Структурная схема измерительной установки

Таблица 1

Выбег частоты при  $U_{пит}=12,6$  В

t, мин	f, МГц	t, мин	f, МГц
0	50.002399	12	50.002360
2	50.002384	14	50.002359
4	50.002373	16	50.002358
6	50.002367	18	50.002357
8	50.002364	20	50.002356
10	50.002361		

Таблица 2

Зависимость частоты от напряжения питания

U <sub>пит</sub> , В	f, МГц	U <sub>пит</sub> , В	f, МГц
5.0	49.99992	9.5	50.00116
5.5	50.00000	10.0	50.0014
6.0	50.00008	10.5	50.0016
6.5	50.00024	11.0	50.0018
7.0	50.00038	11.5	50.0020
7.5	50.00054	12.0	50.0022
8.0	50.00070	12.5	50.0024
8.5	50.00084	13.0	50.0026
9.0	50.00100	13.5	50.0028

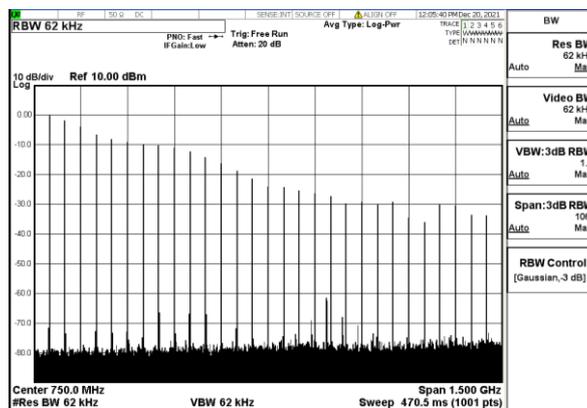


Рис. 4. Спектр на выходе калибратора в полосе 1500 МГц

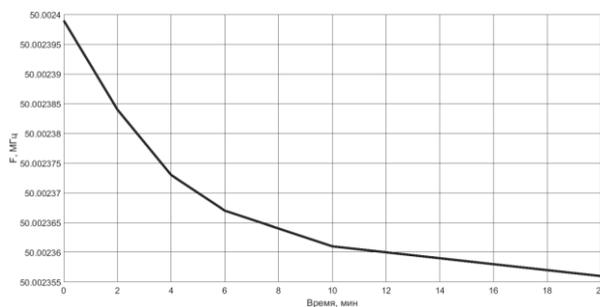


Рис. 5. Выбег частоты за 20 минут

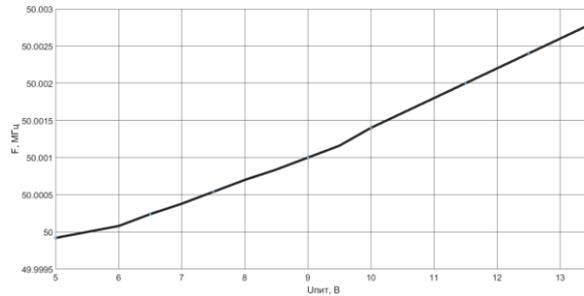


Рис. 6. Зависимость частоты от напряжения питания

В табл. 3 для сравнения приводятся заданные и измеренные параметры калибратора.

Таблица 3

**Основные параметры калибратора**

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Номинальное значение частоты задающего генератора, МГц	50	50
Точность установки частоты задающего генератора, кГц	$\pm 10$	$\pm 2,5$
Мощность первой гармоники выходного сигнала, дБм (мВт)	0 (1)	0 (1)
Неравномерность гармоник в полосе рабочих частот от 50 до 1500 МГц, дБ	–	36
Напряжение питания, В	12,6	12,6
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	50	50
Выбег частоты первой гармоники за 20 минут после включения, кГц	–	0,034
Уход частоты первой гармоники при изменении напряжения питания от 5 до 13,5 В, кГц	–	0,288
Ширина спектральной линии не более, Гц, на уровне минус 40 дБ от максимума	–	4

**Заключение.** В результате проведенного экспериментального исследования выявлены параметры калибратора, отсутствующие в техническом описании на прибор С4-60, а именно:

- ◆ неравномерность гармоник в полосе от 50 до 1500 МГц не более 36 дБ;
- ◆ выбег частоты первой гармоники за 20 минут после включения 0,034 кГц;
- ◆ уход частоты первой гармоники при изменении напряжения питания от 5 до 13,5 В не более 0,288 кГц;
- ◆ ширина спектральной линии первой гармоники на уровне минус 40 дБ от максимума 4 Гц.

Преимуществами исследованного калибратора являются: малые габариты и масса, доступность технологии изготовления (печатная плата на фольгированном стеклотекстолите) и элементной базы.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Анализатор спектра С4-60. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Е Э1.406.056ТО. Ч. 2. 1991 г. – 288 с.
2. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты. – М.: Издат. дом МЭИ, 2010. – 320 с.

3. *Касаткин Л.В., Чайка В.Е.* Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. – Севастополь: Вебер, 2006. – 319 с.
4. *Ризкин И.Х.* Умножители и делители частоты. – М.: Сов. радио, 1976. – 328 с.
5. *Бруевич А.Н., Евтянов С.И.* Аппроксимация нелинейных характеристик и спектры при гармоническом воздействии. – М.: Сов. радио, 1965. – 344 с.
6. *Грибов Э.Б.* Нелинейные явления в приёмно-передающем тракте аппаратуры связи на транзисторах. – М.: Связь, 1971. – 243 с.
7. *Жаботинский М.Е., Свердлов Ю.Л.* Основы теории и техники умножения частоты. – М.: Сов. радио, 1964. – 327 с.
8. *Кищинский А.А. и др.* Умножители частоты на полевых транзисторах с барьером Шотки. Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. – Вып. 10 (1558). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1990. – 32 с.
9. *Соловьёв В.С.* Умножители частоты СВЧ диапазона на транзисторах. Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. – Вып. 17 (1220). – М.: ЦНИИ "Электроника", 1986. – 27 с.
10. Измерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
11. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчёт / под ред. Р.А. Валитова и И.А. Попова. – М.: Сов. радио, 1973. – 464 с.
12. *Дингес С.И., Кочемасов В.Н.* Устройства преобразования частоты / под ред. В.Н. Кочемасова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2020. – 432 с.
13. *Бруевич А.Н.* Умножители частоты. – М.: Сов. радио, 1970. – 247 с.
14. *Зикий А.Н., Помазанов А.В.* Устройства телекоммуникационных систем. Кварцевые генераторы: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. – 129 с.
15. *Rumyantsev K.Y., Zikiy A.N., Zlaman P.N., Mamchenko S.O.* Experimental Investigation of the LTC5553 Microcircuit in the Frequency Multiplication Mode // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – Volt .7, No. 3.13 Special ISSUE 13. – P. 41-43.
16. *Зикий А.Н., Злaman П.Н.* Варакторный умножитель частоты 400 МГц // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Т. 14, № 1. – С. 68-74.
17. *Андреанов А.В., Зикий А.Н., Ронис В.Н.* Умножитель частоты высокой кратности // Сб. статей II МНПК от 20 февраля 2020 года в г. Петрозаводске. МЦНП «Новая наука», 2020. – С. 112-118.
18. *Зикий А.Н., Злaman П.Н., Власенко Д.В., Шипулин М.В.* Умножители частоты миллиметрового диапазона // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2011. – № 17.
19. *Березин В.В.* Моделирование и проектирование широкополосных диодных умножителей частоты КВЧ-диапазона: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Н. Новгород: ННГУ, 2018. – 20 с.
20. Полупроводниковые приборы. СВЧ диоды. Справочник / под ред. Б.А. Наливайко. – Томск, МГП «Раско», 1992. – 224 с.

## REFERENCES

1. Analizator spektra S4-60. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii. E E1.406.056TO [Spectrum analyzer S4-60. Technical description and operating instructions. E E1.406.056TO]. Part 2. 1991, 288 p.
2. *Belov L.A.* Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty [Devices for the formation of microwave signals and their components]. Moscow: Izdat. dom MEI, 2010, 320 p.
3. *Kasatkin L.V., Chayka V.E.* Poluprovodnikovye ustroystva diapazona millimetrovyykh voln [Semiconductor devices of the millimeter wave range]. Sevastopol': Veber, 2006, 319 p.
4. *Rizkin I.Kh.* Umnozhiteli i deliteli chastoty [Multipliers and frequency dividers]. Moscow: Sov. radio, 1976, 328 p.
5. *Bruevich A.N., Evtyanov S.I.* Approksimatsiya nelineynykh kharakteristik i spektry pri garmonicheskom vozdeystvii [Approximation of nonlinear characteristics and spectra under harmonic influence]. Moscow: Sov. radio, 1965, 344 p.
6. *Gribov E.B.* Nelineynye yavleniya v priemo-peredayushchem trakte apparatury svyazi na tranzistorakh [Nonlinear phenomena in the receiving and transmitting path of communication equipment on transistors]. Moscow: Svyaz', 1971, 243 p.
7. *Zhabotinskiy M.E., Sverdlov Yu.L.* Osnovy teorii i tekhniki umnozheniya chastoty [fundamentals of the theory and technique of frequency multiplication]. Moscow: Sov. radio, 1964, 327 p.

8. *Kishchinskiy A.A. i dr.* Umnozhiteli chastoty na polevykh tranzistorakh s bar'erom SHotki. Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh [Frequency multipliers on field-effect transistors with a Schottky barrier. Reviews on electronic technology. Series 1. Microwave Electronics], Issue 10 (1558). Moscow: TSNI "Elektronika", 1990, 32 p.
9. *Solov'ev V.S.* Umnozhiteli chastoty SVCh diapazona na tranzistorakh. Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh [Frequency multipliers of the microwave range on transistors. Reviews on electronic technology. Series 1. Microwave Electronics], Issue 17 (1220). Moscow: TsNII "Elektronika", 1986, 27 p.
10. Izmeritel'naya apparatura SVCh i KVCh. Uzlovaya i elementnaya bazy [Microwave and HF measuring equipment. Node and element bases], ed. by A.M. Kudryavtseva. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 208 p.
11. Radioperedayushchie ustroystva na poluprovodnikovyykh priborakh. Proektirovanie i raschet [Radio transmitting devices on semiconductor devices. Design and calculation], ed. by R.A. Valitova i I.A. Popova. Moscow: Sov. radio, 1973, 464 p.
12. *Dinges S.I., Kochemasov V.N.* Ustroystva preobrazovaniya chastoty [Frequency conversion devices], ed. by V.N. Kochemasova. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2020, 432 p.
13. *Bruevich A.N.* Umnozhiteli chastoty [Frequency multipliers]. Moscow: Sov. radio, 1970, 247 p.
14. *Zikiy A.N., Pomazanov A.V.* Ustroystva telekommunikatsionnykh sistem. Kvartsevye generatory: ucheb. posobie [Devices of telecommunication systems. Quartz oscillators: quartz oscillators]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2018, 129 p.
15. *Rumyantsev K.Y., Zikiy A.N., Zlaman P.N., Mamchenko S.O.* Experimental Investigation of the LTC5553 Microcircuit in the Frequency Multiplication Mode, *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 2018, Volt .7, No. 3.13 Special ISSUE 13, pp. 41-43.
16. *Zikiy A.N., Zlaman P.N.* Varaktorny umnozhitel' chastoty 400 MGts [Varactor frequency multiplier 400 MHz], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrotechnical and Information Complexes and Systems], 2018, Vol. 14, No. 1, pp. 68-74.
17. *Andrianov A.V., Zikiy A.N., Ronis V.N.* Umnozhitel' chastoty vysokoy kratnosti [Frequency multiplier of high multiplicity], *Sb. statey II MNPK ot 20 fevralya 2020 goda v g. Petrozavodsk* [Collection of articles of the II MNPC dated February 20, 2020 in Petrozavodsk]. MTSNP «Novaya nauka», 2020, pp. 112-118.
18. *Zikiy A.N., Zlaman P.N., Vlasenko D.V., Shipulin M.V.* Umnozhiteli chastoty millimetrovogo diapazona [Frequency multipliers of the millimeter range], *Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma* [Informational counteraction to the threats of terrorism], 2011, No. 17.
19. *Berezin V.V.* Modelirovanie i proektirovanie shirokopolosnykh diodnykh umnozhitel'nykh chastoty KVCh-diapazona: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Modeling and design of broadband diode multipliers of the HF frequency range: abstract of the cand. of eng. sc. diss.]. Nizhniy Novgorod: NNGU, 2018, 20 p.
20. Poluprovodnikovyye pribory. SVCh diody. Spravochnik [Semiconductor devices. Microwave diodes. Guide], ed. by B.A. Nalivayko. Tomsk, MGP «Rasko», 1992, 224 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

**Зикий Анатолий Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

**Кочубей Алексей Сергеевич** – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89896270939, магистр, инженер-конструктор 2 категории.

**Zikiy Anatoliy Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

**Kochubey Alexey Sergeevich** – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79896270939, Master, design engineer of the 2nd category.