

19. Shokrani M.R., Khoddam M., Hamidon M.N.B., Kamsani N.A., Rokhani F.Z., Shafie S.B. An RF Energy Harvester System Using UHF Micropower CMOS Rectifier Based on a Diode Connected CMOS Transistor, *The Scientific World Journal*, 2014, Vol. 2014, Article 963709, 11 p.
20. Enz C.C., Krummenacher F., Vittoz E.A. An Analytical MOS Transistor Model Valid in All Regions of Operation and Dedicated to Low-Voltage and Low-Current Applications, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 1995, No. 8, pp. 83-114.
21. Enz C.C., Vittoz E.A. Modeling for Low-Voltage and Low-Power Analog IC Design, *Microelectronic Engineering*, 1997, Vol. 39, pp. 59-76.
22. Enz C.C., Vittoz E.A. Charge-based MOS Transistor Modeling. The EKV model for low-power and RF IC design. London: John Wiley & Sons Ltd., 2006, 303 p.
23. Roy K., Mukhopadhyay S., Mahmoodi-Meimand H. Leakage Current Mechanisms and Leakage Reduction Techniques in Deep-Submicrometer CMOS Circuits, *Proceedings of the IEEE*, 2003, Vol. 91, No. 2, pp. 305-327.
24. Hu C., Niknejad A.M., Chauhan S.Y. BSIM4v4.8.2 MOSFET Model – User’s Manual. USA, CA, Berkeley: University of California, 2020, 176 p.
25. Sicard E., Bendhia S.D. Basics of CMOS Cell Design. USA: McGraw-Hill, 2007, 429 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.Е. Лысенко.

Коноплев Борис Георгиевич – Южный федеральный университет; e-mail: kbg@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; д.т.н.; профессор; научный руководитель Института нанотехнологий, электроники и приборостроения.

Konoplev Boris Georgievich – Southern Federal University; e-mail: kbg@sfedu.ru; Taganrog, Russia; dr. of eng. sc.; professor; scientific advisor, Institute of nanotechnologies, electronics, and equipment engineering.

УДК 621.373

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-183-191

А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

Генераторы, стабилизированные диэлектрическими резонаторами, нашли широкое применение в связи, радиолокации, радионавигации и радиоэлектронной борьбе. Их исследованию посвящено большое число работ, однако повышение требований к ним заставляет разработчиков радиоаппаратуры искать новые технические решения. Особенно важна стабильность частоты генераторов СВЧ в условиях воздействия вибраций, ударов, перепадов температуры, изменения напряжения питания. Влияние внешних воздействующих факторов приводит к появлению паразитных параметров сигнала – уходам частоты, расширению спектральной линии, возрастанию гармоник и субгармоник. Целью данной работы является измерение паразитных параметров выходного сигнала. Объектом исследования является серийный генератор СВЧ. В работе даётся краткое его описание. К генератору предъявляются следующие требования: – расчёт диэлектрического резонатора; – моделирование микрополоскового фильтра из состава умножителя частоты; – рабочая частота $17490 \pm 3,5$ МГц; – выходная мощность не менее 10 дБм; – сопротивление нагрузки 50 Ом; напряжение питания 15 В; ток потребления не более 215 мА. В качестве результатов исследования представлены: – выбег частоты за 15 минут после включения; – зависимость частоты от напряжения питания; – спектр выходного сигнала в полосе 100 кГц; – спектр выходного сигнала в полосе 20 ГГц. Полученные результаты могут быть использованы студентами и преподавателями радиотехнических дисциплин, инженерами – разработчиками радиоаппаратуры. Статья дополняет известные результаты по экспериментальному исследованию генераторов в части паразитных параметров выходного сигнала. Для начинающих исследователей может быть полезна методика эксперимента.

Генератор; стабилизированный диэлектрическим резонатором; схема; конструкция; эксперимент; выбег частоты; зависимость частоты от напряжения питания; спектр; гармоники; субгармоники.

A.N. Zikiy, A.S. Kochubey

TRANSISTOR OSCILLATOR WITH DIELECTRIC RESONATOR

Generators stabilized by dielectric resonators have found wide application in communications, radar, radio navigation and electronic warfare. A large number of works have been devoted to their research, but increasing requirements for them forces radio equipment developers to look for new technical solutions. Especially important is the stability of the frequency of microwave generators under the influence of vibrations, shocks, temperature changes, changes in supply voltage. The influence of external influencing factors leads to the appearance of parasitic signal parameters – frequency departures, expansion of the spectral line, increase of harmonics and subharmonics. The purpose of this work is to measure the parasitic parameters of the output signal. The object of the study is a serial microwave generator. The paper gives a brief description of it. The generator has the following requirements: – calculation of a dielectric resonator; – simulation of a microstrip filter from the frequency multiplier; – operating frequency 17490 ± 3.5 MHz; – output power of at least 10 dBm; – load resistance 50 ohms; – supply voltage 15 V; – consumption current no more than 215 mA. As the results of the study are presented: – frequency run-out in 15 minutes after switching on; – frequency dependence on supply voltage; – the spectrum of the output signal in the 100 kHz band; – the spectrum of the output signal in the 20 GHz band. The results obtained can be used by students and teachers of radio engineering disciplines, engineers – developers of radio equipment. The article complements the well-known results on the experimental study of generators in terms of parasitic parameters of the output signal. For novice researchers, the experimental technique may be useful.

Generator stabilized by a dielectric resonator; circuit; design; experiment; frequency run-out; frequency dependence on supply voltage; spectrum; harmonics; subharmonics.

Введение. Гетеродины приёмников и задающие генераторы передатчиков определяют ряд важных параметров приёмно-передающей и измерительной аппаратуры. В первую очередь – стабильность частоты, диапазон рабочих частот. В ряде случаев параметры гетеродина существенно влияют на чувствительность приёмника, на полезную и паразитную модуляцию задающего генератора передатчика, поэтому их исследование является актуальным.

По генераторам имеется обширная литература, в том числе монографии [1–3], учебное пособие [4], обзоры [5–10], статьи [11–16], диссертации [17, 18], патенты [19, 20], однако на этом тема не исчерпана в связи с широким разнообразием требований, появлением новой элементной базы (транзисторов, микросхем) и новых материалов.

Постановка задачи. Объектом исследования является транзисторный генератор сантиметрового диапазона, стабилизированный диэлектрическим резонатором. Целью исследования является измерение паразитных параметров выходного сигнала, в том числе побочных колебаний в ближней и дальней зоне спектра, выбега частоты, зависимости частоты от напряжения питания. В известных работах такой информации явно недостаточно.

К генератору предъявляются следующие требования:

- ◆ рабочая частота $17490 \pm 3,5$ МГц;
- ◆ выходная мощность не менее 10 дБм;
- ◆ сопротивление нагрузки 50 Ом;
- ◆ напряжение питания 15 В;
- ◆ ток потребления не более 215 мА.

Схема и конструкция. Функциональная схема генератора приведена на рис. 1. Из этой схемы видно, что генератор включает автогенератор на частоту 8745 МГц, вентиль на эту частоту, умножитель частоты на два, вентиль на частоту около 17490 МГц, стабилизатор напряжения. Автогенератор построен на биполярном транзисторе 2Т647А-3 и стабилизирован диэлектрическим резонатором. Умножитель частоты на два построен на полевом транзисторе 3П604Б-2 и содержит в своём составе полосовой фильтр на полуволновых резонаторах.

Конструкцию генератора можно видеть на рис. 2. Корпус генератора выполнен из титана и разделён на 2 отсека. В первом отсеке находится автогенератор на поликоровой печатной плате. Во втором отсеке находится умножитель частоты, два вентиля и стаби-

лизатор напряжения. Диэлектрический резонатор находится под печатной платой автогенератора и связан микрополосковым резонатором через щелевую линию связи в печатной плате. Диэлектрический резонатор укрыт цилиндрической камерой, которая имеет винт плавной подстройки частоты генератора.

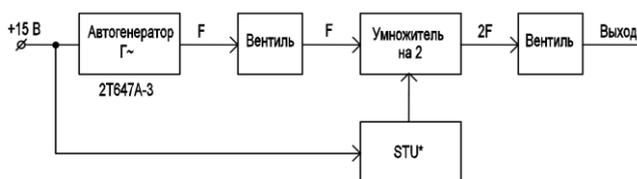


Рис. 1. Функциональная схема генератора



Рис. 2. Фото генератора со снятой крышкой

Расчёт диэлектрического резонатора (ДР). Расчёт ДР проведём по формуле из книги [21]. Резонансная частота равна:

$$f_p = \frac{\sqrt{\beta r^2 + \beta z^2}}{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_r}}$$

где $\beta r = 4,81/D$; $\beta z = \pi q/L$; D – диаметр резонатора; L – высота резонатора; q – число полу-волн, укладываемых по оси z резонатора, принимаем равным 1.

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}.$$

В качестве материала ДР применяется материал ТБНС с $\epsilon_r = 78$ [21]. В качестве первого приближения используем данные из книги [21]: при $D = 4,5$ мм; $L = 2,5$ мм резонансная частота ДР из ТБНС равна 8,5 ГГц.

Расчёт ведётся графоаналитическим методом. Для этого построим график зависимости f_p от L (рис. 3). На этом графике частоте $f_p = 8,745$ МГц соответствует высота резонатора $L = 2,58$ мм (это второе приближение).

Поскольку резонансная частота ДР зависит от наличия вблизи проводящих поверхностей, точное значение резонансной частоты устанавливают в процессе регулировки автогенератора с помощью подстроечного винта, погруженного в камеру с ДР.

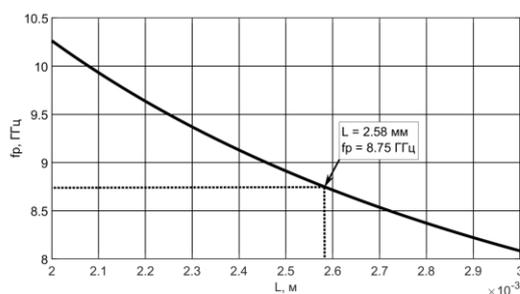


Рис. 3. Зависимость f_p от L для $\epsilon_r = 78$

Моделирование фильтра. Моделирование фильтра проводилось в программе AWR Design Environment. Фильтр должен выделять вторую гармонику сигнала на выходе умножителя частоты и подавлять первую, третью и последующие гармоники частоты 8745 МГц. Поскольку гармоники расположены достаточно далеко друг от друга, для выделения второй гармоники можно использовать простой фильтр, модель которого изображена на рис. 4. Исходные данные для расчёта и моделирования фильтра следующие:

- ◆ центральная частота фильтра 17500 МГц;
- ◆ потери на центральной частоте не более 2 дБ;
- ◆ волновое сопротивление 50 Ом;
- ◆ тип фильтра на полуволновых резонаторах с четвертьволновыми связями;
- ◆ технологическое ограничение – зазоры не менее 100мкм;
- ◆ подложка – поликор с $\epsilon = 9,8$ и толщиной 0,5 мм;
- ◆ толщина меди 10 мкм.

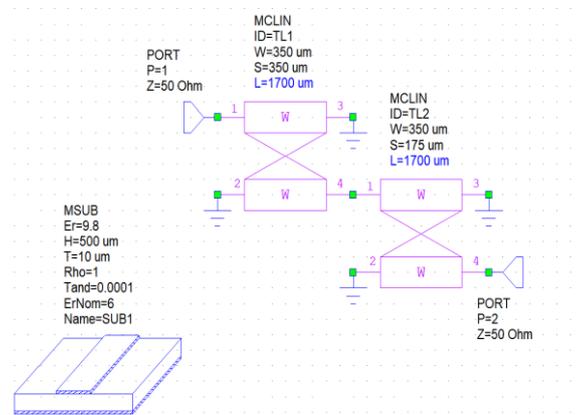


Рис. 4. Модель фильтра в программе AWR Design Environment

На рис. 5 можно видеть амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) фильтра, полученную в результате моделирования. Из рис. 5 видно, что фильтр настроен на частоту 17500 МГц и имеет потери 1,176 дБ, что удовлетворяет требованиям.

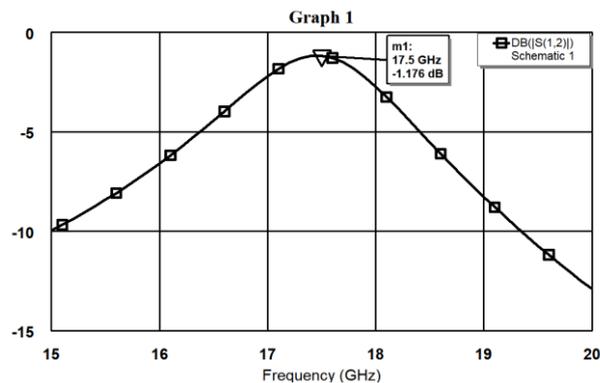


Рис. 5. АЧХ фильтра в программе AWR Design Environment

Эксперимент. Эксперименты проводились на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 6.

В первом эксперименте проводилось измерение выбега частоты за 15 минут. Результаты измерений заносились в табл. 1. По данным табл. 1 построен график на рис. 7. Из этого графика видно, что за 15 минут частота генератора уменьшилась на 550 кГц.

Во втором эксперименте измерена зависимость частоты на выходе генератора от напряжения питания. Результаты измерений занесены в табл. 2. По данным табл. 2 построен график на рис. 8, из которого видно, что при изменении напряжения питания от 10,3 до 15 В частота увеличивается на 946 кГц. Средняя крутизна этой характеристики равна 225 кГц/В.

В третьем эксперименте проводилось фотографирование спектра выходного сигнала. На рис. 9 можно видеть спектр выходного сигнала в полосе 100 кГц. Ширина спектра сигнала на уровне минус 20 дБ от максимума не превышает 1 кГц. На рис. 10 показан спектр выходного сигнала в полосе 20 ГГц. Из него видно, что автогенератор работает на частоте 8745 МГц, а на выходе удвоителя частоты получается сигнал с частотой 17490 МГц. При этом частота 8745 МГц подавлена всего на 25 дБ, что недостаточно для качественного гетеродина. Кроме того, имеется третья гармоника исходного сигнала на частоте 26235 МГц, подавленная на 40 дБ.



Рис. 6. Структурная схема измерительной установки

Таблица 1

Выбег частоты при $U_{пит} = 15 В$

t , мин	$f_{вых}$, кГц	t , мин	$f_{вых}$, кГц
0	17489546	8	17489148
1	17489462	9	17489122
2	17489403	10	17489094
3	17489348	11	17489072
4	17489301	12	17489051
5	17489252	13	17489032
6	17489216	14	17489013
7	17489179	15	17488996

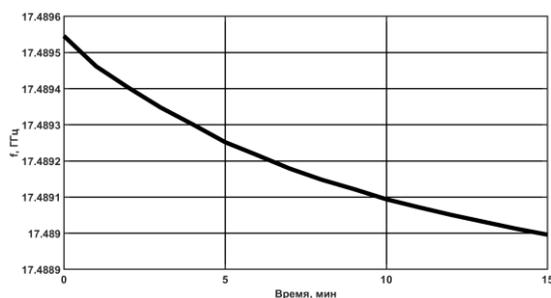


Рис. 7. Выбег частоты за 15 минут

Таблица 2

Зависимость частоты от напряжения питания

$U_{пит}$, В	$f_{вых}$, кГц
10.3	17488055
10.5	17488186
11	17488316

Окончание табл. 1.

$U_{пит}, В$	$f_{вых}, кГц$
11.5	17488447
12	17488512
12.5	17488692
13	17488838
13.5	17488838
14	17488963
14.5	17489001
15	17488968

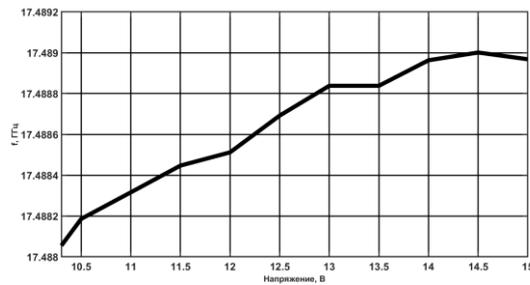


Рис. 8. Зависимость частоты от напряжения питания

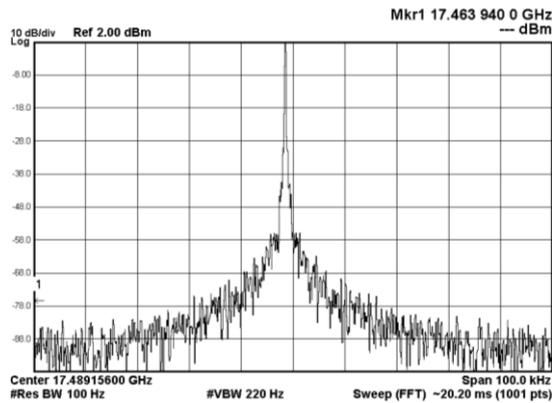


Рис. 9. Спектр сигнала на выходе генератора при полосе обзора 100 кГц

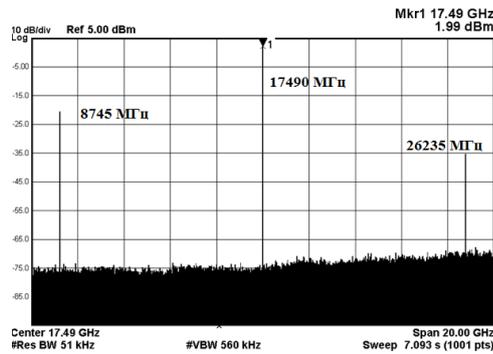


Рис. 10. Спектр сигнала на выходе генератора при полосе обзора 20 ГГц

Заключение. В процессе экспериментального исследования выявлены следующие паразитные параметры выходного сигнала:

- ◆ Ширина спектра сигнала на уровне минус 20 дБ от максимума, не более 1 кГц.
 - ◆ Уровень побочных спектральных составляющих на гармониках и субгармониках не более минус 25 дБ.
 - ◆ Выбег частоты за 15 минут после включения не более 550 кГц.
 - ◆ Уход частоты при изменении напряжения питания от 10,3 В до 15 В составил 946 кГц.
 - ◆ Температурный коэффициент частоты (ТКЧ) отрицательный.
- Основные параметры генератора:
- ◆ Выходная частота $17488 \pm 0,6$ МГц.
 - ◆ Выходная мощность 12 дБм.
 - ◆ Напряжение питания 15 В.
 - ◆ Ток потребления 180 мА.

При его использовании в качестве гетеродина приёмника рекомендуется использовать гетеродинный фильтр для подавления гармоник и субгармоник.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов А.В., Кревский М.А. Транзисторные автогенераторы гармонических СВЧ колебаний. – М.: Горячая линия – Телеком, 2021. – 276 с.
2. Grebennikov A. RF and Microwave transistor oscillator design. – Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd. 2007. – 441 p.
3. Odinec M. RF and Microwave transistor oscillator design. – Artech House. Boston, London, 2002. – 398 p.
4. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Стабильность частоты генераторов СВЧ: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 138 с.
5. Алексейчик Л.В., Бродуленко И.И., Гаврилюк Н.Г., Краюшкин В.В., Мальцев В.А. Параметры и методы анализа ДР и колебательных систем на их основе // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Вып. 5 (1525). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1990. – 64 с.
6. Алексейчик Л.В. и др. Состояние и перспективы применения миниатюрных ДР в радиоэлектронике. Ч. 1. Параметры миниатюрных ДР на СВЧ и методы их расчёта // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 13 (832). – 98 с.
7. Алексейчик Л.В., Бродуленко И.И., Геворкян В.М., Казанцев Ю.А., Парышкин Л.А. Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в радиоэлектронике. Ч. II. Пассивные и активные СВЧ – устройства с миниатюрными диэлектрическими резонаторами // Обзоры по электронной технике. Серия I. Электроника СВЧ. Вып. 2 (865). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1982. – 66 с.
8. Афанасьев А.И., Алексейчик Л.В., Бродуленко И.И., Гаврилюк Н.Г., Мальцев В.А. Состояние, тенденции развития и проектирование стабильных твердотельных генераторов и фильтров СВЧ малой мощности // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Вып. 2 (1968). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1993.
9. Бродуленко И.И., Абраменков А.И., Ковтунов Д.А., Лебедев В.Н., Сергиенко А.М. Стабильные и высокочастотные СВЧ – генераторы на диэлектрических резонаторах // Обзор по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Вып. 10 (1454). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1989. – 61 с.
10. Бродуленко И.И., Афанасьев А.И., Ковтунов Д.А., Лебедев В.Н., Мальцев В.А., Иванов В.В. Стабильные СВЧ генераторы малой мощности. (Проблемы качества и надёжности) // Обзоры по электронной технике. Серия 1. СВЧ техника. Вып. 1 (1696). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1993. – 88 с.
11. Зикий А.Н., Пирогов Д.Ю., Чернышова О.А., Сальный И.А. Генератор с диэлектрическим резонатором // Вопросы специальной радиоэлектроники, серия Общие вопросы радиоэлектроники. – 2008. – № 1. – С. 142-146.
12. Зикий А.Н., Шитулин М.В. Транзисторный автогенератор, стабилизированный диэлектрическим резонатором // Матер. 4 международной научной конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». – Ростов-на-Дону, ЮРГУЭС, 2012. – С. 285-287.
13. Бровченко С.П., Зикий А.Н., Чернышова О.А. СВЧ транзисторный автогенератор, стабилизированный диэлектрическим резонатором // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 3. – С. 182-184.

14. Зикий А.Н., Кочубей А.С. Экспериментальное исследование гетеродинного модуля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 6. – С. 189-196.
15. Белов Л.А., Хилькевич В. Генераторы СВЧ с диэлектрическими резонаторами для стабилизации частоты // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2006. – № 7.
16. Зикий А.Н., Зламан П.Н., Сивокос Е.В. Экспериментальное исследование двух автогенераторов с диэлектрическими резонаторами // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 10. – С. 198-209.
17. Бажилов В.А. Расчёт и исследование цилиндрических экранированных СВЧ и КВЧ колебательных систем на основе диэлектрических резонаторов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, НГТУ, 2007. – 20 с.
18. Царанкин Д.П. Методы генерирования СВЧ колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – М.: МЭИ, 2004.
19. Патент США №6.714.089 High frequency signal source and method of generating same using dielectric resonator oscillator (DRO) circuit. 30.03.2004.
20. Патент США №4.386.326. Dielectric-resonator-tuned Microwave solid state oscillator. 30.05.1983.
21. Радиопередающие устройства / под ред. О.А. Челнокова. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.

REFERENCES

1. Baranov A.V., Krevskiy M.A. Tranzistornyye avtogeneryatory garmonicheskikh SVCh kolebaniy [Transistor autogenerators of harmonic microwave oscillations]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2021, 276 p.
2. Grebennikov A. RF and Microwave transistor oscillator design. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd. 2007, 441 p.
3. Odinec M. RF and Microwave transistor oscillator design. Artech House. Boston, London, 2002, 398 p.
4. Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Stabil'nost' chastoty generatorov SVCh: ucheb. posobie [Frequency stability of microwave generators: tutorial. Rostov-on-Donu – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 138 p.
5. Alekseychik L.V., Brodulenko I.I., Gavrilyuk N.G., Krayushkin V.V., Mal'tsev V.A. Parametry i metody analiza DR i kolebatel'nykh sistem na ikh osnove [Parameters and methods of analysis of DR and oscillatory systems based on them], *Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh* [Reviews on electronic technology. Series 1. Electronics Microwave]. Issue 5 (1525). Moscow: TSNII «Elektronika», 1990, 64 p.
6. Alekseychik L.V. i dr. Sostoyanie i perspektivy primeneniya miniatyurnykh DR v radioelektronike. Ch. 1. Parametry miniatyurnykh DR na SVCh i metody ikh rascheta [The state and prospects of using miniature DRS in radio electronics. Part 1. Parameters of miniature microwave devices and methods of their calculation], *Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh* [Reviews on electronic technology. Series 1. Microwave Electronics], 1981, Issue 13 (832), 98 p.
7. Alekseychik L.V., Brodulenko I.I., Gevorkyan V.M., Kazantsev Yu.A., Paryshkuro L.A. Sostoyanie i perspektivy primeneniya miniatyurnykh dielektricheskikh rezonatorov v radioelektronike. Ch. II. Passivnyye i aktivnyye SVCh – ustroystva s miniatyurnymi dielektricheskimi rezonatorami [The state and prospects of using miniature dielectric resonators in radio electronics. Part II. Passive and active microwave devices with miniature dielectric resonators], *Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh* [Reviews on electronic technology. Series I. Microwave Electronics]. Issue 2 (865). Moscow: TSNII «Elektronika», 1982, 66 p.
8. Afanas'ev A.I., Alekseychik L.V., Brodulenko I.I., Gavrilyuk N.G., Mal'tsev V.A. Sostoyanie, tendentsii razvitiya i proektirovanie stabil'nykh tverdotel'nykh generatorov i fil'trov SVCh maloy moshchnosti [State, development trends and design of stable solid-state generators and low-power microwave filters], *Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh* [Reviews on electronic technology. Series 1. Microwave Electronics]. Issue 2 (1968). Moscow: TSNII «Elektronika», 1993.
9. Brodulenko I.I., Abramnikov A.I., Kovtunov D.A., Lebedev V.N., Sergienko A.M. Stabil'nye i vysokochastotnye SVCh – generatory na dielektricheskikh rezonatorakh [Stable and high-frequency microwave generators on dielectric resonators], *Obzor po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. Elektronika SVCh* [An overview of electronic technology. Series 1. Microwave electronics]. Issue 10 (1454). Moscow: TSNII «Elektronika», 1989, 61 p.
10. Brodulenko I.I., Afanas'ev A.I., Kovtunov D.A., Lebedev V.N., Mal'tsev V.A., Ivanov V.V. Stabil'nye SVCh generatory maloy moshchnosti. (Problemy kachestva i nadezhnosti) [Stable microwave generators of low power. (Quality and reliability issues)], *Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 1. SVCh tekhnika* [Reviews on electronic technology. Series 1. Microwave equipment]. Issue 1 (1696), Moscow: TSNII «Elektronika», 1993, 88 p.

11. Zikiy A.N., Pirogov D.Yu., Chernyshova O.A., Sal'nyy I.A. Generator s dielektricheskim rezonatorom [Generator with a dielectric resonator], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki, seriya Obshchie voprosy radioelektroniki* [Questions of special radio electronics, series General Questions of Radio Electronics], 2008, No. 1, pp. 142-146.
12. Zikiy A.N., Shipulin M.V. Tranzistornyy avtogenerator, stabilizirovanny dielektricheskim rezonatorom [Transistor autogenerator stabilized by a dielectric resonator], *Mater. 4 mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sovremennye problemy radioelektroniki»* [Materials of the 4th International scientific conference "Modern problems of radio electronics"], Rostov-on-Donu, YuRGUES, 2012, pp. 285-287.
13. Brovchenko S.P., Zikiy A.N., Chernyshova O.A. SVCh tranzistornyy avtogenerator, stabilizirovanny dielektricheskim rezonatorom [Microwave transistor generator stabilized by a dielectric resonator], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3, pp. 182-184.
14. Zikiy A.N., Kochubey A.S. Eksperimental'noe issledovanie geterodinnogo modulya [Experimental study of a heterodyne module], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6, pp. 189-196.
15. Belov L.A., Khil'kevich V. Generatory SVCh s dielektricheskimi rezonatorami dlya stabilizatsii chastoty [Microwave generators with dielectric resonators for frequency stabilization], *Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Electronics. The science. Technology. Business], 2006, No. 7.
16. Zikiy A.N., Zlaman P.N., Sivokoz E.V. Eksperimental'noe issledovanie dvukh avtogeneratorov s dielektricheskimi rezonatorami [Experimental study of two autogenerators with dielectric resonators], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern radio electronics], 2015, No. 10, pp. 198-209.
17. Bazhilov V.A. Raschet i issledovanie tsilindricheskikh ekranirovannykh SVCh i KVCh kolebatel'nykh sistem na osnove dielektricheskikh rezonatorov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Calculation and investigation of cylindrical shielded microwave and HF oscillatory systems based on dielectric resonators: abstract of the cand. of eng. sc. diss.], Nizhniy Novgorod, NGTU, 2007, 20 p.
18. Tsarapkin D.P. Metody generirovaniya SVCh kolebaniy s minimal'nym urovnem fazovykh shumov: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk [Methods of generating microwave oscillations with a minimum level of phase noise: abstract of the dr. of eng. sc. diss.], Moscow: MEI, 2004.
19. Patent SShA №6.714.089 High frequency signal source and method of generating same using dielectric resonator oscillator (DRO) circuit. 30.03.2004 [US Patent No. 6,714,089 A source of a high-frequency signal and a method for generating it using a dielectric resonator generator (DRO) circuit. 30.03.2004].
20. Patent SShA №4.386.326. Dielectric-resonator-tuned Microwave solid state oscillator. 30.05.1983 [US Patent No.4.386.326. Microwave solid-state generator tuned to a dielectric resonator. 30.05.1983].
21. Radiopere dayushchie ustroystva [Radio transmitting devices], ed. by O.A. Chelnokova. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 256 p.

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

Зикий Анатолий Николаевич – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Таганрог, Россия; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

Кочубей Алексей Сергеевич – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; тел.: 89896270939; магистр; инженер-конструктор 2 категории.

Zikiy Anatoliy Nikolaevich – Taganrog Research Institute of Communications; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

Kochubey Alexey Sergeevich – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; phone: +79896270939; master's degree; design engineer, category 2.

УДК 621.372.852

DOI 10.18522/2311-3103-2024-2-191-202

Д.В. Харланов, А.В. Лабынцев

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФИЛЬТРА НА ШПИЛЕЧНЫХ РЕЗОНАТОРАХ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

В задачах проектирования микрополосковых фильтров большую роль играет удачный выбор начального приближения для значений искомым геометрических размеров элементов фильтра. Особенно это важно, если проектируемый фильтр обладает новыми конструктивными признаками, и методы синтеза этого устройства еще находятся на стадии разработки. В работе рас-