

## Раздел III. Связь, навигация и радиолокация

УДК 621.373

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-135-142

А.Н. Зикий, А.С. Кочубей

### ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕДАТЧИКА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

*Задающий генератор передатчика являются важнейшей составной частью, так как определяет его стабильность и диапазонные свойства. На рынке России имеется множество моделей автогенераторов отечественного и зарубежного производства. Они различаются по элементной базе (активному элементу), массе, габаритам, стоимости, диапазону рабочих частот и другим параметрам. Во многих случаях паспорт и технические условия не содержат ряд параметров, важных для потребителя. Целью данной работы является исследование основных характеристик генератора, в том числе не задекларированных поставщиком. Объектом исследования является генераторный модуль СВЧ в типовой схеме включения. Представлены результаты экспериментального исследования ГУН, работающего в области 5 ГГц. Дана оценка паразитных продуктов в спектре выходного сигнала. Представлены фото спектра выходного сигнала, демонстрирующего малую ширину спектральной линии. Измерены модуляционные характеристики при изменении управляющего напряжения и напряжения питания, вычислена их средняя крутизна. Эти данные позволяют предъявить обоснованные требования к стабильности управляющего и питающего напряжений. Полученные результаты могут быть использованы в приёмно-передающей аппаратуре связи, навигации. Статья расширяет представление о линейке отечественных генераторов, демонстрирует их высокие электрические характеристики. Достигнуты следующие электрические параметры: – диапазон рабочих частот от 4968 до 5448 МГц; – выходная мощность не менее 11 дБм; – напряжение питания минус 16 В; – управляющее напряжение от 5 до 31,5 В.*

*Генератор; управляемый напряжением; сантиметровый диапазон волн; эксперимент; модуляционная характеристика; ширина спектра.*

A.N. Zikiy, A.S. Kochubey

### MASTER GENERATOR OF CENTIMETER-WAVE INTERFERENCE TRANSMITTER

*The master generator of the transmitter is the most important component, since it determines its stability and range properties. In the Russian market there are many models of auto generators of domestic and foreign production. They differ in the element base (active element), weight, dimensions, cost, operating frequency range, and other parameters. In many cases, the passport and technical specifications do not contain a number of parameters that are important for the consumer. The purpose of this work is to study the main characteristics of the generator, including those not declared by the supplier. The object of the study is a microwave generator module in a typical switching scheme. The results of an experimental study of a VCO operating in the 5 GHz region are presented. The estimation of parasitic products in the spectrum of the output signal is given. Photos of the spectrum of the output signal showing a small width of the spectral line are presented. The modulation characteristics are measured when the control voltage and supply voltage change, and their average steepness is calculated. These data allow us to make reasonable requirements for the stability of the control and supply voltages. The results obtained can be used in receiving and transmitting equipment for communication, navigation, and electronic warfare. The article expands the idea of the line of domestic generators, demonstrates their high*

*electrical characteristics. The following electrical parameters have been achieved: – operating frequency range from 4968 to 5448 MHz; – output power of at least 11 dBm; – supply voltage minus 16 V; – control voltage from 5 to 31.5 V.*

*Voltage-controlled generator; centimeter wave range; experiment; modulation characteristic; spectrum width.*

**Введение.** По генераторам с электронной перестройкой частоты опубликовано значительное число работ, в том числе монографии [1–5], учебные пособия [6–9], статьи [10–13], реклама [14, 15], однако появление новых требований, совершенствование элементной базы заставляет разработчиков искать новые схемотехнические и конструктивно-технологические решения.

Объектом исследования в данной работе является автогенератор сантиметрового диапазона волн, управляемый напряжением.

Целью работы является получение экспериментальных характеристик генератора, в том числе модуляционных характеристик, выбега частоты, выходного спектра.

К исследуемому генератору предъявляются следующие требования:

- ◆ диапазон рабочих частот от 5000 до 5400 МГц;
- ◆ выходная мощность не менее 10 дБм;
- ◆ напряжение питания минус 16 В;
- ◆ управляющее напряжение от 5 до 30 В;
- ◆ сопротивление нагрузки 50 Ом;
- ◆ неравномерность выходной мощности в диапазоне рабочих частот не более 5 дБ;
- ◆ количество выходов – 2.

Перечисленные выше требования можно реализовать в генераторе на транзисторах [3, 8], на диоде Ганна [7], на лавинно-пролётном диоде и на микросхемах [6]. Десятки лет назад использовались технические решения с применением клистронов и ламп обратной волны [4, 5]. Ниже в табл. 1 приведены краткие технические характеристики нескольких полупроводниковых генераторов сантиметрового диапазона волн, взятые из справочных листов.

Таблица 1

**Управляемые генераторы сантиметрового диапазона волн  
(непрямые аналоги)**

Тип микросхемы	Частота, ГГц	$P_{\text{вых}}$ , дБм
НМС358MS8G	5,8 – 6,8	10
НМС384LP4	2,05 – 2,25	3,5
НМС385LP4	2,25 – 2,5	4,5
НМС386LP4	2,6 – 2,8	5
НМС388LP4	3,15 – 3,4	4,9
НМС389LP4	3,35 – 3,55	4,7
НМС390LP4	3,55 – 3,9	4,7
НМС391LP4	3,9 – 4,45	5
НМС416LP4	2,75 – 3	4,5
НМС429LP4	4,45 – 5	4
НМС430LP4	5 – 5,5	2
НМС431LP4	5,5 – 6,1	2
НМС466LP4	6,1 – 6,72	4,5
НМС505LP4	6,8 – 7,4	11
НМС506LP4	7,8 – 8,7	14
НМС532LP4	7,1 – 7,9	14

**Схема и конструкция.** Автогенератор построен по схеме с общим коллектором на биполярном транзисторе 2Т642А-2 [16]. Для перестройки генератора в диапазоне частот в резонатор генератора включён варактор. Автогенератор запитан со стороны эмиттера напряжением минус 16 В. Управляющее напряжение на варактор подаётся в пределах от 5 до 45 В.

Конструкция генератора представляет собой герметичную микросборку в форме цилиндра длиной 82 мм и диаметром 33 мм. Два выхода, установленные на образующей цилиндра, оформлены в виде соединителей ряда IX по ГОСТ 13317-89, гнездо, тип 1 [17]. Напряжения питания и управления подаются на две коаксиальные вилки, установленные на торце цилиндра.

Внутри цилиндра установлена печатная плата автогенератора из поликора и два развязывающих ферритовых циркулятора. Печатная плата на поликоре изготовлена по тонкоплёночной технологии [18].

**Эксперимент.** Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 1. Основной измерительный прибор –анализатор спектра типа MXA N9020В фирмы Keysight.

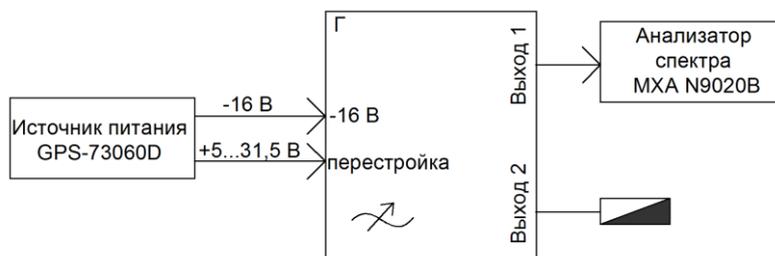


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

В первом эксперименте исследована зависимость мощности и частоты от управляющего напряжения с шагом 1 В. Результаты измерений заносились в табл. 2. По данным табл. 2 построены графики на рис. 2. В этом эксперименте использовался прогретый генератор.

Таблица 2

**Результаты измерений генератора**

Уупр, В	Частота, МГц	Рвых, дБм
	4968	11.81
	4992	11.24
	5013	11.23
	5035	11.52
	5055	11.93
	5073	12.13
	5092	11.86
	5111	11.62
	5133	11.97
	5153	12.39
	5173	12.54
	5192	12.49
	5211	12.52
	5230	12.83

	5248	12.99
	5265	13.14
	5284	13.37
	5302	13.74
	5318	14.06
	5334	14.27
	5350	14.46
	5365	14.61
	5380	14.72
	5396	14.95
	5412	15.11
	5426	15.05
	5441	15.09
31.5	5448	15.08

Во втором эксперименте снята зависимость частоты от напряжения питания с шагом 0,2 В. Результаты измерений заносились в табл. 3. Из табл. 3 видно, что частота генерации не зависит от напряжения питания благодаря встроенному стабилизатору напряжения. В этом эксперименте использовался прогретый генератор.

В третьем эксперименте снят выбег частоты с шагом 1 минута в течении 12 минут. Результаты измерений заносились в табл. 4. По данным табл. 4 построен график на рис. 3. Из этого графика видно, что стационарное значение частоты достигается через 5 минут после включения. Это свидетельствует о хорошем отводе тепла от транзистора на подложку и облегчённом режиме работы транзистора. В этом эксперименте использовался остывший генератор.

В четвёртом эксперименте проводилось фотографирование спектра сигнала. Его можно видеть на рис. 4. Из этого рисунка видно, что боковые лепестки спектра подавлены на 45–50 дБ, что является удовлетворительным результатом.

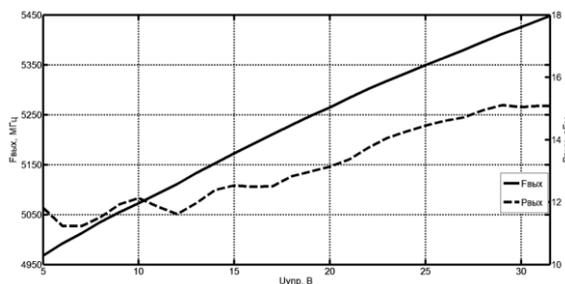


Рис. 2. Зависимость мощности и частоты от управляющего напряжения

Таблица 3

**Зависимость частоты от напряжения питания при  $U_{упр} = 10 В$**

Уупр, В	Частота, МГц
15	5073.849
15.2	5073.849
15.4	5074.043
15.6	5073.946
15.8	5073.849
16	5073.946

16.2	5073.946
16.4	5073.801
16.6	5073.849
16.8	5073.849
17	5073.849

Таблица 4

**Выбег частоты при  $U_{упр} = 10 В$ ;  $U_{пит} = -16 В$**

Время, мин	Частота, МГц
	5070.662
	5072.304
	5073.366
	5073.849
	5074.043
	5074.043
	5074.043
	5073.994
	5074.043
	5074.043
	5073.946
	5074.043

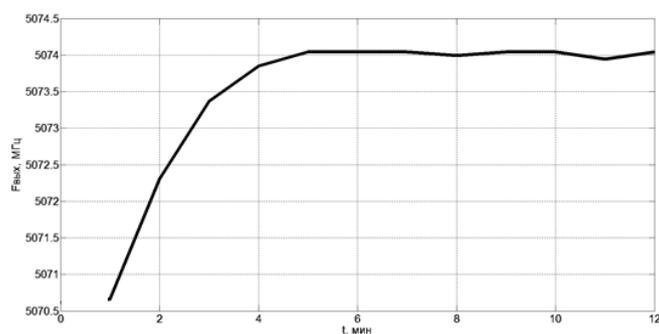


Рис. 3. Выбег частоты за 12 минут

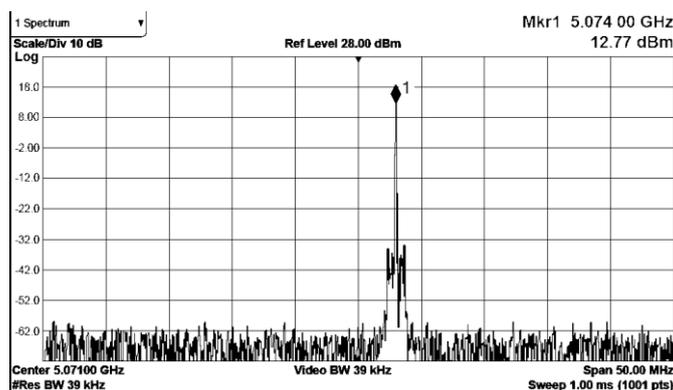


Рис. 4. Фото спектра выходного сигнала генератора при  $U_{упр} = 10 В$

Ниже в табл. 5 приведены основные параметры автогенератора, заданные и измеренные.

Таблица 5

### Основные параметры генератора

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Нижняя частота генерации, МГц	5000	4968
Верхняя частота генерации, МГц	5400	5448
Выходная мощность, не менее, дБм	10	11,23
Напряжение питания, В	Минус 16	Минус 16
Напряжение управления, В	5 – 30	5 – 31,5
Ток потребления, мА	50	50
Сопrotивление нагрузки, Ом	50	50
Минимальная крутизна перестройки, МГц/В	–	14
Максимальная крутизна перестройки, МГц/В	–	24
Неравномерность выходной мощности, дБ	5	3,88
Количество выходов	2	2
Выбег частоты за 12 минут после включения, МГц	–	3,43

**Заключение.** Из табл. 5 видно, что все требования к генератору выполняются. Генератор рекомендуется использовать в передатчиках помех в качестве задающего. Высокая линейность модуляционной характеристики, отсутствие перегибов частоты позволяет применять его в приёмно-передающей и измерительной аппаратуре.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконешиников В.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
2. Соколинский В.Г., Шейнкман В.Г. Частотные и фазовые модуляторы и манипуляторы. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
3. Верещагин Е.М. и др. Транзисторно-варакторные генераторы / под ред. Ю.Г. Никитенко. – Киев: Техника, 1979. – 175 с.
4. Верещагин Е.М. Модуляция в генераторах СВЧ. – М.: Сов. радио, 1972. – 304 с.
5. Генераторы и усилители СВЧ / под ред. И.В. Лебедева. – М.: Радиотехника, 2005. – 325 с.
6. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты: учеб. пособие. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 320 с.
7. Романюк В.А. Аналоговые устройства приёмопередатчиков: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2018. – 144 с.
8. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Передатчики помех современным средствам связи: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – 176 с.
9. Бахвалова С.А., Романюк В.А. Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 152 с.
10. Андрианов А.В., Давтян А.Д., Зикий А.Н. Генератор ЧМ сигналов // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: [ivdon.ru/tu/magazine/archive/n2y2019/5722/](http://ivdon.ru/tu/magazine/archive/n2y2019/5722/).
11. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Падалко А.Д. Задающий генератор для передатчика скользящих помех // Сборник научных трудов 14 международной конференции «Наука России: цели и задачи». Ч. 4. – Екатеринбург: НИЦ «Л-Журнал», 2019. – С. 5-8.

12. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Шутов И.И. ЧМ – генератор с высокой линейностью модуляционной характеристики // МНК теоретических и прикладных разработок «Научные разработки: евразийский регион». – М., 2019. – С. 111-114.
13. Мазеев Е.В., Фурсаев М.А. Проектирование СВЧ транзисторного генератора с варакторной перестройкой частоты и моделирование его электрических характеристик // Вестник СГТУ. – 2011. – № 3 (57). – Вып. 1. – С. 68-73.
14. Дьяконов В.П. Монолитные СВЧ – генераторы и синтезаторы компании Hittite Microwave // Компоненты и технологии. – 2012, – № 3. – С. 19-28.
15. Дьяконов В.П. Сверхскоростная твердотельная электроника. Т. 1. Приборы общего назначения. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 600 с.
16. Петухов В.М. Биполярные транзисторы средней и большой мощности СВЧ и их зарубежные аналоги // Справочник. Т. 4. – М.: КУБК-а, 1997. – 544 с.
17. Джуринский К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
18. Климачёв И.И., Иовдальский В.А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования / под ред. А.Н. Королёва. – М.: Техносфера, 2006. – 352 с.
19. Andrei Grebennikov. RF and Microwave Transistor Oscillator Design. – John Wiley & Sons, Ltd., 2007
20. Ali Hajimiri, Thomas H. Lee. The Design of Low Noise Oscillators. – Kluwer Academic Publishers, New York et al., 2003. – 207 p.

## REFERENCES

1. Kochemasov V.N., Belov L.A., Okoneshnikov V.S. Formirovanie signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey [Formation of signals with linear frequency modulation]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 192 p.
2. Sokolinskiy V.G., Sheynkman V.G. Chastotnye i fazovye modulyatory i manipulyatory [Frequency and phase modulators and manipulators]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 192 p.
3. Vereshchagin E.M. i dr. Tranzistorno-varaktornyye generatory [Transistor-varactor generators] ed. by Yu.G. Nikitenko. Kiev: Tekhnika, 1979, 175 p.
4. Vereshchagin E.M. Modulyatsiya v generatorakh SVCh [Modulation in microwave generators]. Moscow: Sov. radio, 1972, 304 p.
5. Generatory i usiliteli SVCh [Microwave generators and amplifiers], ed. by I.V. Lebedeva. Moscow: Radiotekhnika, 2005, 325 p.
6. Belov L.A. Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty: ucheb. posobie [Devices for forming microwave signals and their components: textbook]. Moscow: Izd. dom MEI, 2010, 320 p.
7. Romanyuk V.A. Analogovye ustroystva priemperedatchikov: ucheb. posobie [Analog devices of transceivers: textbook]. Moscow: Solon – Press, 2018, 144 p.
8. Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Peredatchiki pomekh sovremennym sredstvam svyazi: ucheb. posobie [Transmitters of interference to modern means of communication: training manual]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, 176 p.
9. Bakhvalova S.A., Romanyuk V.A. Osnovy modelirovaniya i proektirovaniya radiotekhnicheskikh ustroystv v Microwave Office: ucheb. posobie [Fundamentals of modeling and design of radio engineering devices in Microwave Office: textbook]. Moscow: Solon-Press, 2016, 152 p.
10. Andrianov A.V., Davtyan A.D., Zikiy A.N. Generator ChM signalov [FM signal generator], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, No. 2. Available at: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5722/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5722/).
11. Andrianov A.V., Zikiy A.N., Padalko A.D. Zadayushchiy generator dlya peredatchika skol'zyashchikh pomekh [Setting generator for a sliding interference transmitter], *Sbornik nauchnykh trudov 14 mezhdunarodnoy konferentsii «Nauka Rossii: tseli i zadachi»* [Collection of scientific papers of the 14th International Conference "Science of Russia: goals and objectives"]. Part 4. Ekaterinburg: NITS «L-Zhurnal», 2019, pp. 5-8.
12. Andrianov A.V., Zikiy A.N., Shutov I.I. ChM-generator s vysokoy lineynost'yu modulyatsionnoy kharakteristiki [FM-generator with high linearity of the modulation characteristic], *MNK teoreticheskikh i prikladnykh razrabotok «Nauchnye razrabotki: evraziyskiy region»* [MNC of Theoretical and Applied developments "Scientific developments: the Eurasian region"]. Moscow, 2019, pp. 111-114.

13. *Mazeev E.V., Fursaev M.A.* Proektirovanie SVCh tranzistornogo generatora s varaktor-noy perestroymoy chastoty i modelirovanie ego elektricheskikh kharakteristik [Design of a microwave transistor generator with varactor frequency tuning and modeling of its electrical characteristics], *Vestnik SGTU* [Bulletin of SSTU], 2011, No. 3 (57), Vyp. 1, pp. 68-73.
14. *D'yakov V.P.* Monolitnye SVCh – generatory i sintezatory kompanii Hittite Microwave [Monolithic microwave generators and synthesizers of the Hittite Microwave company], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2012, No. 3, pp. 19-28.
15. *D'yakov V.P.* Sverkhskorostnaya tverdotel'naya elektronika. T. 1. Pribory obshchego naznacheniya [Super-high-speed solid-state electronics. Vol. 1. General purpose devices]. Moscow: DMK Press, 2013, 600 p.
16. *Petukhov V.M.* Bipolyarnye tranzistory sredney i bol'shoy moshchnosti SVCh i ikh zarubezhnye analogi [Bipolar transistors of medium and high power of microwave and their foreign analogues], *Spravochnik* [Guide]. Vol. 4. Moscow: KUBK-a, 1997, 544 p.
17. *Dzhurinskiy K.B.* Miniaturnye koaksial'nye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCh [Miniature coaxial radio components for microwave microelectronics]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 216 p.
18. *Klimachev I.I., Iovdal'skiy V.A.* SVCh GIS. Osnovy tekhnologii i konstruirovaniya [Microwave GIS. Fundamentals of technology and design], ed. by A.N. Koroleva. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 352 p.
19. *Andrei Grebennikov.* RF and Microwave Transistor Oscillator Design. John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
20. *Ali Hajimiri, Thomas H. Lee.* The Design of Low Noise Oscillators. Kluwer Academic Publishers, New York et al., 2003, 207 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: 89896270939; Master; design engineer of the 2nd category.

УДК 528.526

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-142-154

**Д.Е. Чикрин, С.В. Голоусов**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КАЛИБРОВКИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

*Технологии автономных робототехнических комплексов колесного типа становятся более востребованными в последнее время. Отдельным видом применения таких технологий является автономный беспилотный наземный транспорт. В отличие от других видов транспорта (воздушных, водных) наземным транспортным средствам требуется периодически функционировать в условиях полной автономности – при недоступности внешней связи с инфраструктурой, другими агентами транспортной сети. В таких обстановках*