

## Раздел IV. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.373

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-224-232

**Д.В. Беляев, А.Н. Зикий, А.С. Кочубей, А.Б. Ремпе**

### ГЕНЕРАТОР КОНТРОЛЬНЫХ СИГНАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Генераторы контрольных сигналов (ГКС) позволяют оперативно проводить оценку состояния радиоприёмной аппаратуры в период её эксплуатации, поэтому их исследованию и разработке уделяется большое внимание. Очень часто в качестве генераторов контрольных сигналов используют генераторы шума или генераторы на диодах Ганна с низкой стабильностью частоты. В связи с появлением доступных микросхем синтезаторов частоты со встроенным генератором управляемым напряжением предпринята попытка использовать синтезатор частоты в качестве задающего генератора в генераторе контрольных сигналов. Применение микросхемы синтезатора частоты с последовательной загрузкой кодов управления привело к необходимости использовать микроконтроллер. Проведено экспериментальное исследование двухчастотного генератора контрольных сигналов. Представлена функциональная схема ГКС. Дано краткое описание элементной базы. В качестве задающего генератора использован синтезатор двух частот Si4133GT. В качестве результатов исследования представлены: – спектр выходного сигнала; – осциллограммы выходного сигнала; – зависимость выходной мощности от частоты для трёх экземпляров ячейки; – зависимость выходной мощности от кода управления аттенюатором. Достигнуты следующие результаты: – рабочие частоты 450 и 1200 МГц; – выходная мощность каждого канала не менее 100 мкВт; – относительная нестабильность несущей частоты  $10^{-5}$ ; – диапазон изменения затухания ступенчатого аттенюатора не менее 20 дБ; – глубина импульсной модуляции не менее 30 дБ; – диапазон длительностей модулирующих импульсов от 10 до 100 мкс; – диапазон изменения периода повторения от 300 до 1000 мкс; – имеется возможность ввода внешнего контрольного сигнала. По большинству параметров разработанный ГКС превосходит параметры ГКС, ранее разработанных на предприятии. ГКС предполагается использовать в составе многоканального приемника.*

*Генератор контрольных сигналов; синтезатор частот; импульсная модуляция; эксперимент; спектр выходного сигнала; осциллограммы.*

**D.V. Belyaev, A.N. Zikiy, A.S. Kochubey, A.B. Rempе**

### CONTROL SIGNAL GENERATOR OF A NEW GENERATION

*Control signal generators (SCS) allow for the rapid assessment of the condition of radio receiving equipment during its operation, therefore, much attention is paid to their research and development. Very often, noise generators or generators on Gann diodes with low frequency stability are used as control signal generators. Due to the appearance of available frequency synthesizer chips with a built-in voltage-controlled generator, an attempt has been made to use a frequency synthesizer as a master generator in a control signal generator. The use of a frequency synthesizer chip with sequential loading of control codes led to the need to use a microcontroller. An experimental study of a two-frequency control signal generator has been carried out. The functional scheme of the GCS is presented. A brief description of the element base is given. A two-frequency synthesizer Si4133GT was used as a master generator. As the results of the study are presented: – output signal spectrum; – waveforms of the output signal; – dependence of the output*

power on the frequency for three instances of the cell; – dependence of the output power on the attenuator control code. The following results have been achieved: – operating frequencies 450 and 1200 MHz; – the output power of each channel is at least 100 MW; – relative instability of the carrier frequency  $10^{-5}$ ; – the attenuation range of the step attenuator is not less than 20 dB; – pulse modulation depth of at least 30 dB; – duration range of modulating pulses from 10 to 100 microseconds; – the range of variation of the repetition period from 300 to 1000 microseconds; – it is possible to enter an external control signal. By most parameters, the developed GCS exceeds the parameters of the GCS previously developed at the enterprise. GCS is supposed to be used as part of a multi-channel receiver.

Control signal generator; frequency synthesizer; pulse modulation; experiment; output signal spectrum; waveforms.

**Введение.** При проектировании многоканального приемника потребовался генератор контрольных сигналов (ГКС). По устройствам генерирования и формирования радиосигналов имеется обширная литература, в том числе монографии [1, 2], учебные пособия [3–7], статьи [8–11] и патенты [12, 13].

Традиционно в ГКС в качестве задающего генератора используется генераторы на поверхностных акустических волнах [7], транзисторные генераторы, стабилизированные диэлектрическими резонаторами [7], генераторы на диодах Ганна [8, 9, 11], генераторы, управляемые напряжением, на микросхеме [10]. В данной работе предпринята попытка использовать синтезатор частот [2, 6].

К генератору контрольных сигналов предъявляются следующие требования:

- ◆ Рабочие частоты 450 и 1200 МГц;
- ◆ Выходная мощность не менее 100 мкВт;
- ◆ Импульсная модуляция выходных сигналов с параметрами;
- ◆  $\tau_{\text{д}} = 10\text{--}100$  мкс; T повт. = 300–1000 мкс.;
- ◆ Относительная нестабильность выходных частот не хуже  $10^{-5}$ ;
- ◆ Управление выходной мощностью в пределах 20–30 дБ;
- ◆ Глубина импульсной модуляции в пределах 30–40 дБ;
- ◆ Возможность ввода внешнего контрольного сигнала.

В соответствии с этими требованиями была разработана функциональная схема генератора контрольных сигналов, которая приведена на рис. 1.

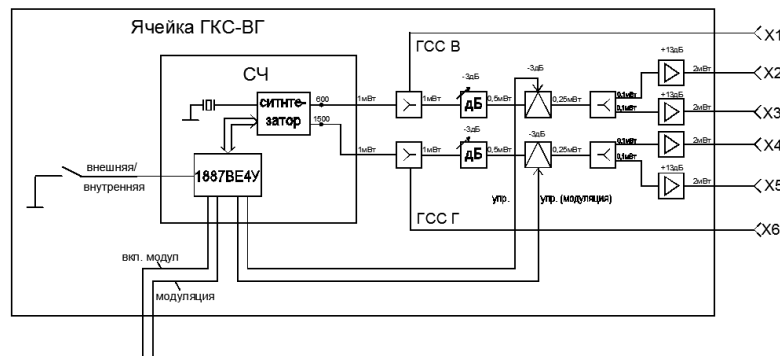


Рис. 1. Функциональная схема ячейки ГКС

Из этого рисунка видно, что задающим генератором является синтезатор двух частот типа Si4133 GT [14]. Выходные сигналы синтезатора объединяются вместе с внешними сигналами в сумматорах типа ТСР-2-25, управляются по мощности в ступенчатых аттенюаторах типа МААТСС007 и поступают на импульсные модуляторы, которые построены на базе двухканальных переключателей типа НМС284MS [15]. После модуляторов сигналы делятся на две равные части по

мощности и усиливаются в малошумящих усилителях типа ERA-3SM. Выходные сигналы с четырех усилителей ERA-3SM поступают на выходные соединители типа СК-9 [17].

Управление синтезатором частоты и модуляторами осуществляется с помощью микроконтроллера типа 1887BE4У [19, 20].

**Конструкция.** Ячейка размещена на печатной плате размером 170 на 200 мм. С одной стороны печатной платы размещен низкочастотный разъем СНП 260 на 90 контактов. С другой стороны печатной платы установлены 6 соединителей типа СК9-РПМУ- X-076.1.М (Тип IX по ГОСТ13317-89). Из них 2 входа и 4 выхода. Печатная плата имеет 4 металлических слоя и 3 диэлектрических. Внешние слои меди имеют толщину 18 мкм, внутренние слои (GND и питания) по 35 мкм. В качестве диэлектрика используют материал FR-4 [16].

Между высокочастотными проводниками и GND находится диэлектрик толщиной 0,3 мм и  $\epsilon=4\dots 6$ .

**Эксперимент.** Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 2.

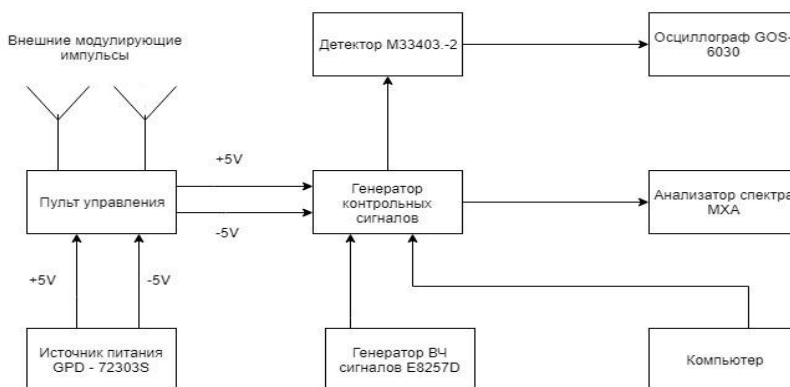


Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

Перед проведением измерений в микроконтроллер из компьютера загружалась программа его работы. После этого компьютер отключался. В режиме амплитудной модуляции выходной сигнал ГКС наблюдался на экране анализатора спектра (рис. 3).

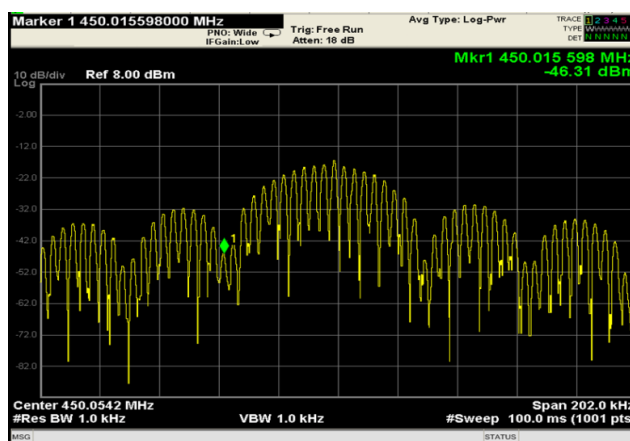


Рис. 3. Спектр радиопульсов с низкой частотой 450 МГц, длительностью 30 мкс и периодом 300 мкс

В режиме импульсной модуляции сигнал наблюдался на осциллографе как на радиочастоте (рис. 4 – верхний луч), так и после детектирования (рис. 4 – нижний луч).

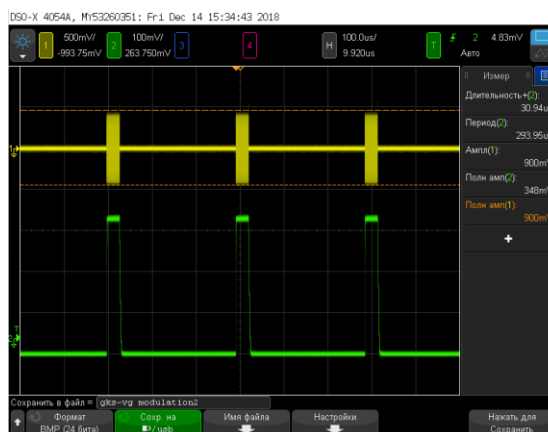


Рис. 4. Осциллограмма модулированного радиосигнала и его огибающей с выхода детектора

Результаты измерения выходной мощности ГКС в режиме непрерывной генерации заносились в табл. 1. По данным табл. 1 построены 4 графика на рис. 5. Измерения проводились только для верхнего диапазона частот, где наблюдался дефицит мощности. Измерения проводились в полосе рабочих частот синтезатора от 1100 МГц до 1430 МГц с шагом 10 МГц.

Таблица 1

Результаты испытаний ГКС в диапазоне частот

Частоты, МГц	Выходная мощность ГКС, мкВт			Частоты, МГц	Выходная мощность ГКС, мкВт		
	Экз.2	Экз.3	Экз.4		Экз.2	Экз.3	Экз.4
1100	-	271	58	1280	77	-	84
1110	-	293	58	1290	-	87	71
1120	-	-	63	1300	67	-	60
1130	-	-	69	1310	-	72	50
1140	-	-	75	1320	59	-	42
1150	195	206	81	1330	-	-	36
1160	-	-	86	1340	57	-	32
1170	156	-	95	1350	-	-	28
1180	-	-	103	1360	53	-	24
1190	-	-	114	1370	-	52	20
1200	125	-	125	1380	45	-	17
1210	-	-	134	1390	-	-	14
1220	110	-	138	1400	40	-	12
1230	-	-	136	1410	-	-	11
1240	95	-	128				
1250	-	91	118	1420	36	-	9
1260	82	-	107	1430	-	30	8
1270	-	86	96				

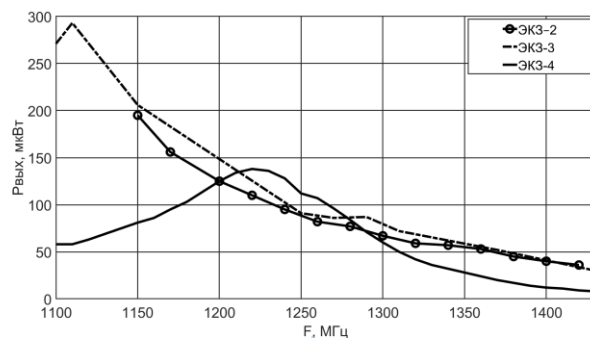


Рис. 5. Зависимость выходной мощности от рабочей частоты для нескольких экземпляров ГКС

В следующем эксперименте была снята зависимость выходной мощности ГКС от кода управления аттенуатором от пульта управления. Результаты измерений заносились в табл. 2. По данным табл. 2 построены графики на рис. 6. В этом эксперименте были задействованы 4 старших разряда аттенуаторов из 5, поэтому шаг изменения затухания находится около 2 дБ. При этом на частоте 320 МГц шаг изменения затухания несколько меньше 2 дБ, а на частоте 1330 МГц шаг изменения затухания несколько больше 2 дБ. Отклонения экспериментальных кривых от идеальных можно объяснить паразитными связями между проводниками.

Таблица 2

Зависимость выходной мощности ГКС от кода управления

Двоичный код управления Млд. р. ст.р.	Десятичный эквивалент кода	Мощность в нижнем канале ( $f=320\text{МГц}$ ), дБм	Мощность в верхнем канале ( $f=1330\text{МГц}$ ), дБм
0000	0	-0,74	-15,31
1000	2	-2,77	-18,58
0100	4	-4,93	-21,15
1100	6	-6,83	-23,76
0010	8	-8,83	-25,87
1010	10	-10,60	-28,29
0110	12	-12,53	-30,29
1110	14	-14,24	-32,56
0001	16	-15,40	-35,07
1001	18	-17,01	-37,36
0101	20	-18,72	-39,26
1101	22	-20,19	-41,53
0011	24	-21,75	-43,28
1011	26	-23,01	-45,59
0111	28	-24,30	-47,20
1111	30	-25,36	-49,60

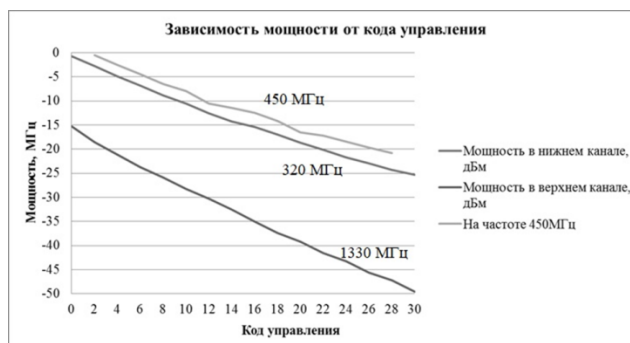


Рис. 6. Зависимость выходной мощности от кода управления

Ниже в табл. 3 приведено сравнение заданных и достигнутых параметров генератора контрольных сигналов.

Таблица 3

**Основные параметры ГКС**

Наименование параметра, размерность	Задано	Достигнуты	Аналог
Рабочие частоты, МГц	450 1200	450 1200	ДМВ ДМВ
Выходная мощность, мкВт	100-1000	125	100
Относительная нестабильность частоты	$\pm 10^{-5}$	$\pm 10^{-5}$	$10^{-4}$
Диапазон изменения затухания ступенчатого аттенюатора, дБ	20	>24 дБ в нижнем канале >34 дБ в верхнем канале	Нет функции
Глубина импульсной модуляции, дБ (подавление сигнала в паузе)	30-40	33	>30
Диапазон длительностей модулирующих импульсов, мкс	10-100	10-100	10-100
Диапазон изменения периода повторения, мкс	300-1000	300-1000	300-1000
Возможность ввода внешнего контрольного сигнала	Есть	есть	нет
Возможность перепрограммирования рабочих частот	Есть	есть	нет
Масса, кг	-	0,2	-
Габариты, мм	-	178x226x25,5	180x230

**Выводы.** Разработан комплект конструкторской документации на генератор контрольных сигналов. Изготовлен образец и проведены его испытания. Получены спектр и осциллограммы выходного сигнала, зависимость выходной мощности от частоты для трёх экземпляров генератора, зависимость выходной мощности от кода управления аттенюатором. Достигнуты следующие результаты:

- ◆ Рабочие частоты 450 и 1200 МГц;
- ◆ Выходная мощность каждого канала не менее 100 мкВт;

- ◆ Относительная нестабильность несущей частоты  $10^{-5}$ ;
- ◆ Диапазон изменения затухания ступенчатого аттенюатора не менее 20 дБ;
- ◆ Глубина импульсной модуляции не менее 30 дБ;
- ◆ Диапазон длительностей модулирующих импульсов от 10 до 100 мкс;
- ◆ Диапазон изменения периода повторения от 300 до 1000 мкс;
- ◆ Имеется возможность ввода внешнего контрольного сигнала.

По большинству параметров разработанный ГКС превосходит параметры ГКС, ранее разработанных на предприятии. ГКС предполагается использовать в составе многоканального приёмника.

Таким образом, разработанный генератор контрольных сигналов по сравнению с аналогом имеет меньшую массу, габариты, стоимость, выше стабильность частоты и шире функциональные возможности по управлению частотой и мощностью.

Полученные результаты дают основания предположить, что в ближайшие годы генераторы контрольных сигналов на базе синтезаторов частоты будут созданы на нашем предприятии и в сантиметровом диапазоне волн.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиопередающие устройства / под ред. О.А. Челнокова. – М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.
2. Ченакин А.В., Горевой А.В. Практическое построение синтезаторов частот СВЧ диапазона. – М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 280 с.
3. Романюк В.А. Аналоговые устройства приёмопередатчиков: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2018. – 144 с.
4. Шахильдян В.В., Карякин В.Л. Проектирование устройств генерирования и формирования сигналов в системах подвижной радиосвязи: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2011. – 400 с.
5. Першин В.Т. Формирование и генерирование сигналов в цифровой радиосвязи: учеб. пособие. – М.: Инфра-М, 2013. – 614 с.
6. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты. – М.: Издательский дом МЭИ, 210. – 320 с.
7. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Стабильность частоты генераторов СВЧ: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 138 с.
8. Беляев Д.В., Зикий А.Н., Пономаренко А.А., Чернышова О.А. Экспериментальное исследование генератора контрольных сигналов миллиметрового диапазона // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия «Общие вопросы радиоэлектроники». – 2007. – № 1. – С. 178-181.
9. Зикий А.Н., Беляев Д.В., Додаев С.Э. Экспериментальное исследование генератора контрольных сигналов с магнитной перестройкой // Известия ТРТУ. – 2005. – № 9. – С. 141.
10. Зикий А.Н., Кучугура А.В., Сивокоз Е.В., Шакунов С.А. Микрополосковый генератор контрольных сигналов миллиметрового диапазона // Международная научно-практическая конференция «Актуальные научные исследования в современном мире». – 2015. – № 1. – Ч. 2. – С. 47-50.
11. Зикий А.Н., Беляев Д.В., Додаев С.Э. Генератор контрольных сигналов с магнитной перестройкой // Вопросы специальной радиоэлектроники, серия Общие вопросы радиоэлектроники. – 2005. – № 1. – С. 72-76.
12. Романкевич А.М. и др. Генератор испытательных кодов. А.С. СССР №1.405.058. Оpubл. 18.11.1986, м. кл. G06F 11/26.
13. Кочемасов В.Н. и др. Формирователь сигналов с заданным законом изменения фазы. А.С. СССР №1.385.239. Оpubл. 20.11.1986., м. кл. H03C 3/00.
14. Dual-band RF Synthesizer WITH Integrated VCOS FOR Wireless Communication Si4133. Silicon Laboratories, Rev.1.13/01. – 34 p.
15. SPDT Non-reflective Switch HMC284MS86/HMC284MS86 Hittite Microwave Corporation. – P. 166-171.
16. Мылов Г.В. Печатные платы. Выбор базовых материалов. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2015. – 176 с.

17. Соединительные радиочастотные коаксиальные СК-9. ТУ6313-006-38970729-11. Технические условия. – 40 с.
18. *Зикий А.Н., Зламан П.Н., Горбатенко О.А.* Экспериментальное исследование ступенчатого аттенюатора // Матер. I Всероссийской научно-практической конференции «Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояния, проблемы и пути решения». Курск, 24-26 апреля 2014.
19. Микросхемы 1887BE / 1887BE4Y / Технические условия АЕЯР.431280.537ТУ.
20. Микросхема 1887BE4Y. Техническое описание КФДЛ.431295.039ТС.

#### REFERENCES

1. Radioperedayushchie ustroystva [Radio transmitting devices], ed. by O.A. Chelnokova. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 256 p.
2. *Chenakin A.V., Gorevoy A.V.* Prakticheskoe postroenie sintezatorov chastot SVCh diapazona [Practical construction of microwave frequency synthesizers]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2021, 280 p.
3. *Romanyuk V.A.* Analogovye ustroystva priemopredatchikov: ucheb. posobie [Analog devices transceivers: a tutorial]. Moscow: Solon-Press, 2018, 144 p.
4. *Shakhgil'dyan V.V., Karyakin V.L.* Proektirovanie ustroystv generirovaniya i formirovaniya signalov v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi: ucheb. posobie [Designing devices for generating and forming signals in mobile radio systems: a tutorial]. Moscow: Solon-Press, 2011, 400 p.
5. *Pershin V.T.* Formirovanie i generirovanie signalov v tsifrovoy radiosvyazi: ucheb. posobie [Formation and generation of signals in digital radio communication: a tutorial]. Moscow: Infra-M, 2013, 614 p.
6. *Belov L.A.* Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty [Devices for the formation of microwave signals and their components]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 210, 320 p.
7. *Zikiy A.N., Pomazanov A.V.* Stabil'nost' chastoty generatorov SVCh: ucheb. posobie [Frequency stability of microwave generators: a tutorial]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2017, 138 p.
8. *Belyaev D.V., Zikiy A.N., Ponomarenko A.A., Chernyshova O.A.* Eksperimental'noe issledovanie generatora kontrol'nykh signalov millimetrovogo diapazona [Experimental study of the generator of control signals of the millimeter range], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya «Obshchie voprosy radioelektroniki»* [Issues of special radio electronics. Series "General questions of radio electronics"], 2007, No. 1, pp. 178-181.
9. *Zikiy A.N., Belyaev D.V., Dodaev S.E.* Eksperimental'noe issledovanie generatora kontrol'nykh signalov s magnitnoy perestroykoy [Experimental study of a control signal generator with magnetic tuning], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2005, No. 9, pp. 141.
10. *Zikiy A.N., Kuchugura A.V., Sivokoz E.V., Shakunov S.A.* Mikropoloskovyy generator kontrol'nykh signalov millimetrovogo diapazona [Microstrip generator of control signals in the millimeter range], *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire»* [International scientific-practical conference "Actual scientific research in the modern world"], 2015, No. 1, Part 2, pp. 47-50.
11. *Zikiy A.N., Belyaev D.V., Dodaev S.E.* Generator kontrol'nykh signalov s magnitnoy perestroykoy [Control signal generator with magnetic tuning], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki, seriya Obshchie voprosy radio-elektroniki* [Issues of special radio electronics, series General issues of radio electronics], 2005, No. 1, pp. 72-76.
12. *Romankevich A.M. i dr.* Generator ispytatel'nykh kodov. A.S. SSSR №1.405.058. Opubl. 18.11.1986, m. kl. G06F 11/26 [Test code generator. Author's certificate of the USSR No. 1.405.058. Published 11/18/1986, m. G06F 11/26].
13. *Kochemasov V.N. i dr.* Formirovatel' signalov s zadannym zakonom izmeneniya fazy. A.S. SSSR №1.385.239. Opubl. 20.11.1986., m. kl. H03S 3/00 [Signal shaper with a given law of phase change. Author's certificate of the USSR No. 1.385.239. Published 11/20/1986., M. class. H03C 3/00].
14. Dual-band RF Synthesizer WITH Integrated VCOS FOR Wireless Communication Si4133. Silicon Laboratories, Rev.1.13/01, 34 p.



15. SPDT Non-reflective Switch HMC284MS86/HMC284MS86 Hittite Microwave Corporation, pp. 166-171.
16. Mylov G.V. Pечатnye platy. Vybor bazovykh materialov [Printed circuit boards. Choice of base materials]. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2015, 176 p.
17. Soedinitel'nye radiochastotnye koaksial'nye SK-9. TU6313-006-38970729-11. Tekhnicheskie usloviya [Connecting radio-frequency coaxial SK-9. TU6313-006-38970729-11. Specifications], 40 p.
18. Zikiy A.N., Zlaman P.N., Gorbatenko O.A. Eksperimental'noe issledovanie stupenchatogo attenuatora [Experimental study of a step attenuator], *Mater. I Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Infokommunikatsii i informatsionnaya bezopasnost': sostoyaniya, problemy i puti resheniya». Kursk, 24-26 aprelya 2014* [Proceedings of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference "Infocommunications and Information Security: States, Problems and Solutions". Kursk, April 24-26, 2014].
19. Mikroskhemy 1887BE / 1887BE4Y / Tekhnicheskie usloviya AEYAR.431280.537TU [Microcircuits 1887BE / 1887BE4Y / Specifications AEYAR.431280.537TU].
20. Mikroskhema 1887VE4U. Tekhnicheskoe opisanie KFDL.431295.039TS [Chip 1887BE4U. Technical description KFDL.431295.039TS].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

**Беляев Денис Владимирович** – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: denisb2002@mail.ru; г. Таганрог, Россия; начальник НТЦ.

**Ремпе Антон Борисович** – e-mail: antonrempe@yandex.ru; инженер.

**Зикий Анатолий Николаевич** – e-mail: zikiy50@mail.ru; к.т.н.; с.н.с.

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

**Belyaev Denis Vladimirovich** – Taganrog Research Institute of Communications; e-mail: denisb2002@mail.ru; Taganrog, Russia; head of the STC.

**Rempe Anton Borisovich** – e-mail: antonrempe@yandex.ru; engineer.

**Zikiy Anatoly Nikolaevich** – e-mail: zikiy50@mail.ru; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Kochubey Alexey Sergeevich** – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; phone: +79896270939; master; design engineer of the 2nd category.

УДК 528.811

DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-232-240

**Б.М. Азизов, А.Н. Бадалова, Х.Н. Мамедов**

### **ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Рассмотрены основные рабочие параметры, характеризующие опτικο-электронные приборы и исследованы особенности факторов, влияющих на них. Из рассматриваемых показателей были выделены функции чувствительности, разрешающей способности и передачи шумов. Проанализированы теоретические вопросы взаимосвязи между входящими параметрами. Исследования показали, что причиной возникновения ряда погрешностей является переход обрабатывающего оборудования из линейной области в нелинейный. Переход системы в нелинейный режим должен определяться в зависимости как от внутренних и внешних факторов, так и от интервала, в котором определяется функция. В процессе исследовательской работы было выявлено, что в качестве основного внутреннего фактора можно считать изменение температуры и связанных с ней другие параметры системы, а в качестве внешнего фактора – атмосферное влияние, обладающее большой ди-*