

11. ARP5583. Guide to certification of aircraft in a high intensity radiated field (hurf) environment. 2010.
12. EUROCAE ED 107. Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment. 2010.
13. AC/AMJ 20.1317. The certification of aircraft electrical and electronic systems for operation in the high intensity radiated field (HIRF) environment, 1998.
14. SAE ARP 5416 Revision A - aircraft lightning test methods, SAE Aerospace, 2013.
15. SAE ARP 5412 Revision B - aircraft lightning environment and related test waveforms, SAE Aerospace, 2013.
16. AC 20 136 Revision B - Aircraft electrical and electronic system lightning protection, Federal Aviation Administration, 2011.
17. 14 CFR. Code of Federal Regulations CFR). Title 14. Aeronautics and space.
18. CS-25 EASA. Certification Specification. Large aeroplanes.
19. RTCA DO-160E. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment, December 2004.
20. EUROCAE ED 14. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment training, revision G, January 2015.
21. EUROCAE ED-130. Guidance for the development of portable electronic devices (ped) tolerance for civil aircraft, revision b, June 2022.

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

Можайцев Виталий Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: mvp_emc@inbox.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79094302590; аспирант.

Семенихина Диана Викторовна – e-mail: d_semenikhina@mail.ru; тел.: + 79094412058; кафедра АиРПУ; д.т.н.; профессор.

Mozhaytsev Vitaliy Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: mvp_emc@inbox.ru; Taganrog, Russia; phone: +79094302590; postgraduate student.

Semenikhina Diana Viktorovna – e-mail: d_semenikhina@mail.ru; phone: + 79094412058; the department of A&RTD; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 624.372.632

DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-234-244

А.Н. Зикий, П.Н. Зламан, А.В. Помазанов

БАЛАНСНЫЙ СМЕСИТЕЛЬ

Проведено экспериментальное исследование балансного смесителя на диодах 2A116A-1. Измерены потери преобразования в диапазоне входных частот 2450±45 МГц при преобразовании вниз на промежуточную частоту 2125 МГц. Потери преобразования не превышают 20 дБ в узкой полосе 2440±10 МГц. Снята амплитудная характеристика смесителя, из которой видно, что она линейна для входных сигналов до 0 дБм (1 мВт). Исследована зависимость потерь преобразования от мощности гетеродина. Показано, что минимальные потери наблюдаются при мощности гетеродина 13 дБм (20 мВт). Спектр комбинационных частот на выходе смесителя не содержит паразитных продуктов преобразования выше минус 50 дБ по отношению к полезному сигналу в полосе 100 МГц. Смеситель рекомендуется использовать в приемно-передающей аппаратуре и измерительной технике. Сравнение с другими смесителями показывает заметное преимущество – высокую избирательность по отношению к внеполосным сигналам. Это достигнуто путем применения двух полосовых фильтров и фильтра нижних частот. Проведено моделирование трех фильтров в пакете прикладных программ Microwave Office. Даны модели и амплитудно-частотные характеристики трех фильтров, полученные в Microwave Office. Смеситель выполнен в корпусе рамочного типа из алюминия. В нем установлены две керамические

платы размером 24x30 мм (материал 22ХС). Метод изготовления рисунка печатных плат – тонкопленочная технология. Корпус закрывается двумя герметичными крышками. Все три соединителя – типа IX ГОСТ13317, гнездо.

Смеситель; преобразование частоты вниз; потери преобразования; амплитудно-частотная характеристика; амплитудная характеристика; зависимость потерь от мощности гетеродина; полосовые фильтры; фильтр нижних частот.

A.N. Zikiy, P.N. Zlaman, A.V. Pomazanov

BALANCED MIXER

An experimental study of a balanced mixer based on 2A116A-1 diodes was carried out. Conversion losses were measured in the input frequency range of 2450 ± 45 MHz during down conversion to an intermediate frequency of 2125 MHz. Conversion loss does not exceed 20 dB in a narrow band of 2440 ± 10 MHz. The amplitude characteristic of the mixer was taken, from which it can be seen that it is linear for input signals up to 0 dBm (1 mW). The dependence of conversion losses on the local oscillator power is studied. It is shown that the minimum losses are observed at a local oscillator power of 13 dBm (20 mW). The combination frequency spectrum at the mixer output does not contain parasitic conversion products above minus 50 dB with respect to the useful signal in the 100 MHz bandwidth. The mixer is recommended for use in receiving and transmitting equipment and measuring equipment. Comparison with other mixers shows a noticeable advantage - high selectivity in relation to out-of-band signals. This is achieved by applying two band pass filters and a low pass filter. Three filters were simulated in the Microwave Office software package. Models and amplitude-frequency characteristics of three filters from Microwave Office are given. The mixer is made in a frame-type case made of aluminum. It has two ceramic boards sized 24x30 mm (material 22xc). The method of manufacturing a printed circuit board pattern is thin-film technology. The case is closed by two tight covers. All three connectors are type IX GOST13317, socket.

Down conversion; conversion loss; frequency response; amplitude response; loss versus local oscillator power; band pass filters; low pass filter.

Введение. Смесителям СВЧ диапазона посвящена обширная отечественная и зарубежная литература, в том числе монографии [1–4], учебные пособия [5, 6], статьи [7–9], диссертации [10–12], патенты [13] однако при этом тема смесителей далеко не исчерпана.

Наиболее широко используются на практике небалансные, балансные и двойные балансные смесители [2]. Балансные и двойные балансные смесители имеют подавление шумов гетеродина и реже набор комбинационных частот высокого уровня, поэтому им отдают обычно предпочтение.

Объектом исследования является балансный диодный смеситель из состава измерительного прибора Х1-55 [14].

Целью работы является измерение основных параметров и характеристик балансного диодного смесителя, которые в литературе [14] не приводятся.

К смесителю предъявляются следующие требования [14]:

- ◆ диапазон рабочих частот по сигналу 2453 ± 10 МГц;
- ◆ рабочая частота гетеродина 328 МГц;
- ◆ диапазон промежуточных частот 2125 ± 10 МГц;
- ◆ потери преобразования не более 20 дБ;
- ◆ волновое сопротивление входа и выхода 50 Ом;

Схема конструкции. Смеситель, построенный по схеме балансного смесителя на диодах типа 2A116A-1 [15], состоит из двух керамических плат, расположенных в унифицированном корпусе размером 60x24 мм. По входу сигнала смесителя стоит полосно-пропускающий фильтр, состоящий из двух параллельно связанных полуволновых резонаторов, настроенных на частоту сигнала ($f_c=2453$

МГц), по входу гетеродина ($f_1=328$ МГц) стоит четырехзвенный фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза 350 МГц. На выходе смесителя стоит полосно-пропускающий фильтр, настроенный на разностную частоту гетеродина и сигнала, равную 2125 МГц. Потери преобразования смесителя не более 20 дБ.

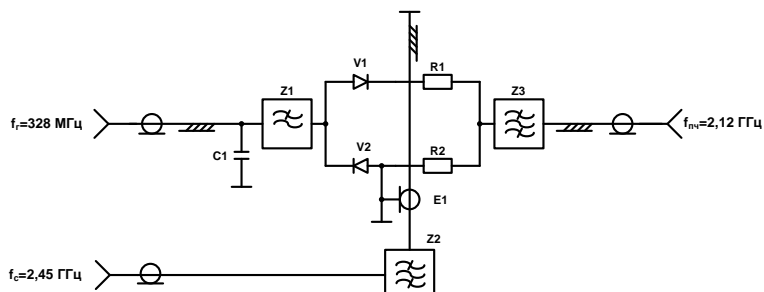


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная смесителя

На рис. 2 можно видеть конструкцию смесителя со снятой верхней крышкой. Там же можно видеть следы регулировки в виде капель оловянно-свинцового припоя.

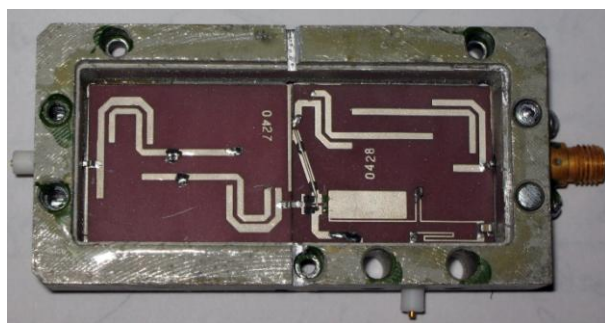


Рис. 2. Фото балансного смесителя из состава Х1-55

Геометрические размеры двух полосовых фильтров приведены в табл. 1 и 2. Эти размеры могут быть рассчитаны по методике из книги [16].

Таблица 1

Геометрические размеры фильтра 2453 МГц

Поз. обознач.	Длина, мм	Ширина, мм	Зазор, мм	Наименование
W1	4	1	-	Подводящая линия передачи
W2	2	1	-	Подводящая линия передачи
W3	11,5	1	0,6	Связанные линии
W4	11,5	1	2,3	Связанные линии
W5	11,5	1	0,6	Связанные линии
ϵ	9,8 (керамика 22 ХС)			Относительная диэлектрическая проницаемость
$\text{tg } \delta$	0,001			Тангенс угла диэлектрических потерь
	10 мкм			Толщина медного проводника вместе с серебряным покрытием
h	1 мм			Толщина подложки

Таблица 2

Геометрические размеры фильтра 2125 МГц

Поз. обознач.	Длина, мм	Ширина, мм	Зазор, мм	Наименование
W1	2,5	1	-	Подводящая линия передачи
W2	2,7	1	-	Подводящая линия передачи
W3	13,3	1	0,7	Связанные линии
W4	13,3	1	2,6	Связанные линии
W5	13,3	1	0,7	Связанные линии
ϵ	9,8 (керамика 22 ХС)			Относительная диэлектрическая проницаемость
$\text{tg } \delta$	0,001			Тангенс угла диэлектрических потерь
	10 мкм			Толщина медного проводника вместе с серебряным покрытием
h	1 мм			Толщина подложки

Моделирование. Моделирование фильтров проводилось в среде Microwave Office [17, 18]. На рис. 3 можно видеть модель фильтра 2453 МГц, составленную по данным из табл. 1. На рис. 4 можно видеть АЧХ этого фильтра. Она удовлетворяет заданным требованиям.

На рис. 5 показана модель фильтра 2125 МГц, созданная по данным табл. 2. На рис. 6 изображена АЧХ фильтра 2125 МГц. Она соответствует предъявленным требованиям.

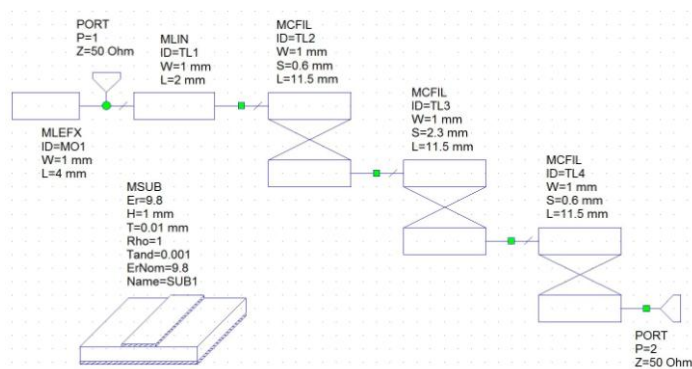


Рис. 3. Модель полосового фильтра 2453 МГц в MWO

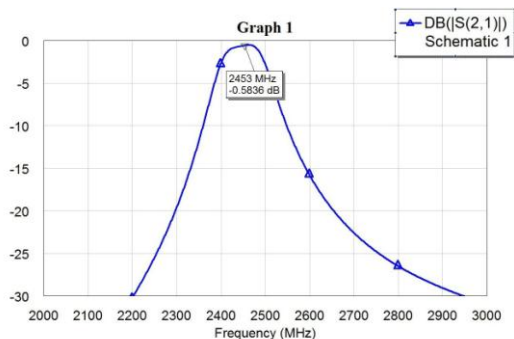


Рис. 4. АЧХ полосового фильтра 2453 МГц из MWO

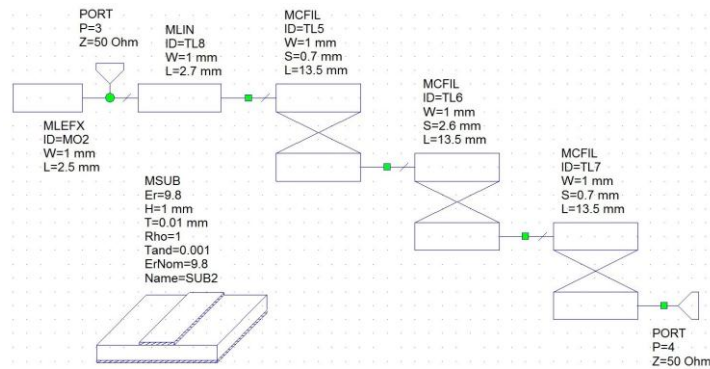


Рис. 5. Модель полосового фильтра 2125 МГц в MWO

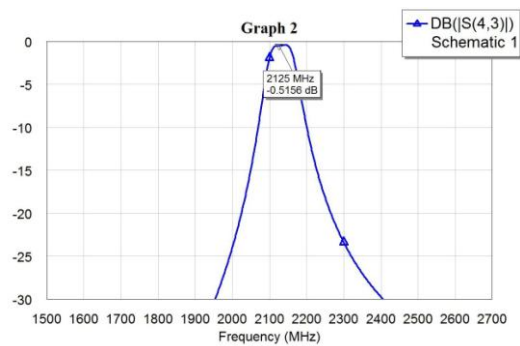


Рис. 6. АЧХ полосового фильтра 2125 МГц из MWO

На рис. 7 представлена модель фильтра нижних частот с полосой пропускания около 350 МГц. На рисунке 8 можно видеть амплитудно-частотную характеристику ФНЧ, из которой видно, что фильтр имеет допустимые потери в полосе пропускания (менее 3 дБ).

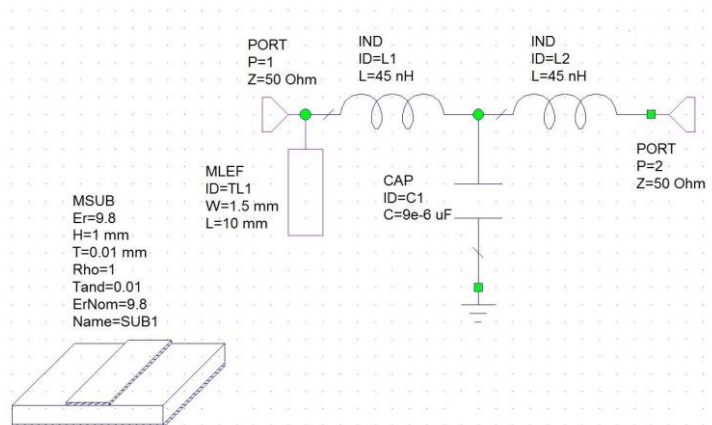


Рис. 7. Модель ФНЧ 350 МГц из MWO

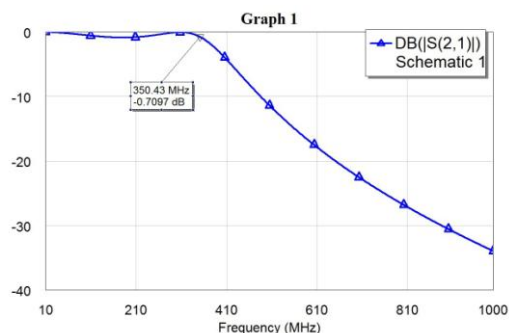


Рис. 8. АЧХ ФНЧ 350 МГц из MWO

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой показана на рис. 9. В первом эксперименте снята частотная зависимость потерь преобразования при изменении частоты сигнала от 2400 до 2490 МГц с шагом 10 МГц. Результаты занесены в табл. 3. По данным таблицы 3 построен график на рис. 10.

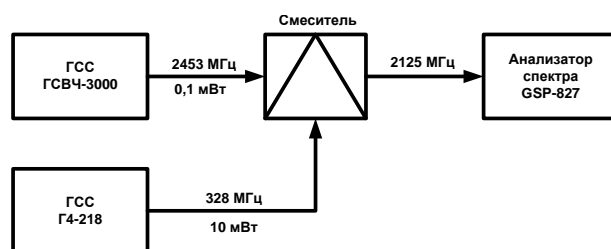


Рис. 9. Структурная схема измерительной установки

Во втором эксперименте измерена зависимость потерь от мощности гетеродина. Мощность гетеродина менялась от -3 дБм до +13 дБм. Результаты измерений занесены в табл. 4. По данным таблицы 4 построен график на рис. 11.

В третьем эксперименте измерена амплитудная характеристика смесителя. Результаты измерений занесены в табл. 5. По данным табл. 5 построен график на рис. 12.

В четвертом эксперименте проводилось фотографирование спектра выходного сигнала (рис. 13). Из него видно, что в области промежуточных частот 2125 ± 25 МГц спектр не содержит комбинационных частот заметного уровня.

Таблица 3

Частотная зависимость потерь

Частота, МГц	P_c на входе, дБм	$P_{гет}$, дБм	$P_{вых}$, дБм	Потери, дБ
2400	-10	8,4	-37	27
2410			-34	24
2420			-31	21
2430			-30	20
2440			-30	20
2450			-30	20
2460			-34	24
2470			-37	27
2480			-41	31
2490			-44	34

Таблица 4

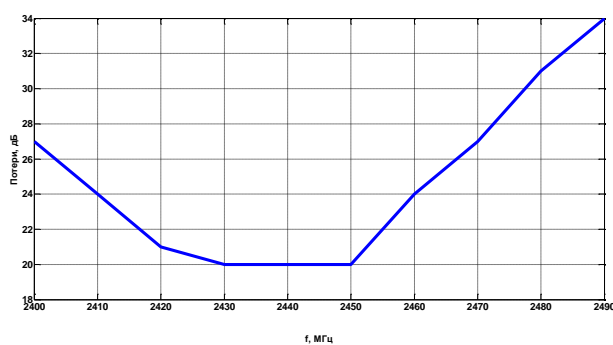
Зависимость потерь от мощности гетеродина при $f_r=328$ МГц; $f_c=2453$ МГц

$P_{гет}, дБм$	P_c на входе, дБм	$P_{вых}, дБм$ 2125 МГц	Потери, дБ
-3	-10	-49	39
-2		-44	34
-1		-39	29
0		-36	26
1		-34	24
2		-33,5	23,5
3		-33	23
4		-33	23
5		-32,5	22,5
6		-32	22
7		-32	22,5
8		-32	22,5
9		31,5	21
10		-31	21
11		-31	21
12	-31	21	
13	-30	20	

Таблица 5

Амплитудная характеристика смесителя при $f_r=328$ МГц; $f_c=2453$ МГц

P_c дБм	$P_{вых}, дБм$	Потери, дБ
-10	-30	20
-8	-28	20
-6	-26	20
-4	-25	21
-2	-23	21
0	-21	21

Рис. 10. Частотная зависимость потерь преобразования ($f_r=328$ МГц; $P_r=13$ дБм; $P_c=-10$ дБм)

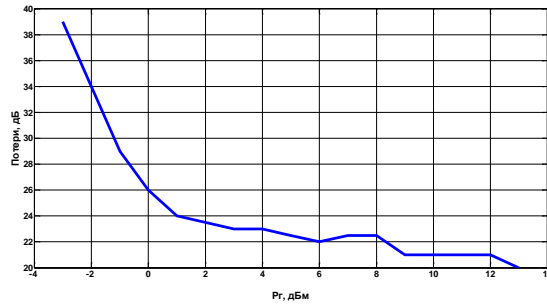


Рис. 11. Зависимость потерь от мощности гетеродина ($f_s=328$ МГц; $f_c=2446$ МГц; $P_c=-10$ дБм)

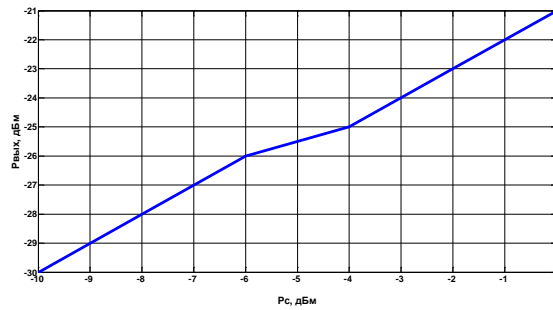


Рис. 12. Амплитудная характеристика смесителя ($f_s=328$ МГц; $f_c=2453$ МГц; $P_s=13$ дБм)

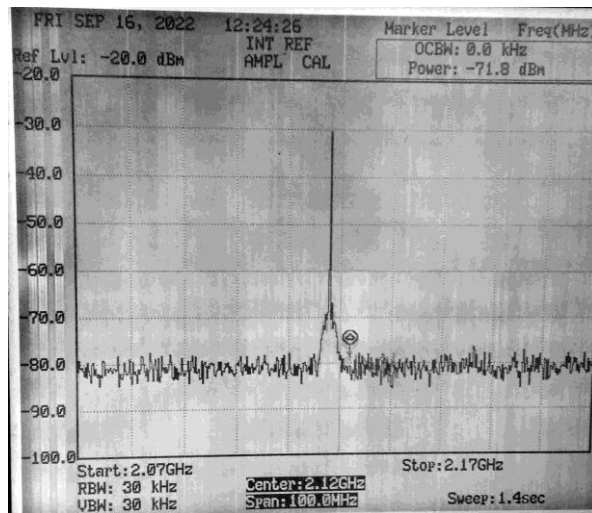


Рис. 13. Фото спектра выходного сигнала

Графики на рис. 10–13 позволяют сформулировать количественные выводы. Ниже в табл. 6 проводится сравнение заданных и достигнутых параметров смесителя.

Таблица 6

Основные параметры смесителя

Наименование параметра, размерность	Задано	Модель	Эксперимент
Диапазон рабочих частот по сигналу, МГц	328	238	328
Диапазон рабочих частот по гетеродину, МГц	2453±10	2453±10	2440±10
Диапазон промежуточных частот, МГц	2125±10	2125±10	2125±10
Потери преобразования не более, дБ	20	-	20
Мощность гетеродина, дБм	10-13	-	10-13
Волновое сопротивление входа и выхода, Ом	50/50	50/50	50/50

Выводы. Проведено экспериментальное исследование диодного балансного смесителя на микрополосковых линиях. Получены экспериментальные зависимости потерь преобразования в диапазоне частот, амплитудная характеристика, зависимость потерь преобразования от мощности гетеродина, спектр выходного сигнала.

Проведено моделирование трёх входящих фильтров (два полосовых и один фильтр нижних частот). Представлены модели фильтров и их амплитудно-частотные характеристики. Ранее перечисленные характеристики данного смесителя не публиковались.

Требования к смесителю выполняются, хотя ожидаемые потери смесителя были около 15 дБ. Возможные причины:

- ◆ не учтены потери в кабелях подключения в измерительной установке;
- ◆ места подключения сигнала и гетеродина поменяны;
- ◆ смеситель включает три фильтра, которые вносят потери.

Такой смеситель можно использовать в приемно-передающей технике и измерительной аппаратуре [3, 19, 20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дингес С.И., Кочемасов В.Н. Устройства преобразования частот / под ред. В.Н. Кочемасова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2020. – 432 с.
2. Maas S.A. Microwave Mixers. – Artech House, Norwood, MA. 1986. – 368 p.
3. Щитов А.М. и др. Диодные преобразователи частоты для радиоизмерительной аппаратуры СВЧ и КВЧ диапазонов. – Н. Новгород, НГТУ, 2016. – 195 с.
4. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная база / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
5. Клюй А.А., Румянцев К.Е. Преобразователи частоты: учеб.-метод. пособие. – Таганрог: ТРТУ, 1996. – 93 с.
6. Микроэлектронные устройства СВЧ: учеб. пособие / под ред. Г.И. Веселова. – М.: Высшая школа, 1988. – 280 с.
7. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Зламан П.Н. Экспериментальное исследование смесителя на микросхеме LTC5553 // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – № 1. – Т. 14. – С. 68-74.
8. Зикий А.Н., Плёнкин А.П. Смесители дециметрового диапазона на комбинации линий передачи // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 3.
9. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Зламан П.Н. Исследование динамического диапазона смесителя по комбинационным составляющим // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – № 2. – Т. 14. – С. 74-78.
10. Шапошникова Ж.В. Нелинейные многочастотные режимы твердотельных смесителей СВЧ диапазона: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – Воронеж: ВГУ, 2011. – 16 с.
11. Сумин А.М. Разработка методик проектирования преобразователей частоты в интегральном исполнении: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. – Воронеж: ВГУ, 2012. – 18 с.

12. *Чиликов А.А.* Моделирование и проектирование сверхширокополосных диодных преобразователей частоты для радиоизмерительной аппаратуры СВЧ и КВЧ – диапазонов: дисс. ... канд. тех. наук. – Н. Новгород, ННГУ, 2021. – 146 с.
13. Patent USA №4.739.519, Apr 19, 1988. Coplanar Microwave Balun, Multiplexer and Assemblies. /Eugene C Findley, Sunnyvale, Calif/.
14. Прибор для исследования амплитудно-частотных характеристик Х1-55. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 1.400.293ТО. – М.: Внешторгиздат, 2006. – 196 с.
15. Полупроводниковые приборы. СВЧ диоды. Справочник / под ред. Б.А. Наливайко. – Томск: МГП «РАСКО», 1992.
16. *Зелях Э.В., Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Брилон В.С.* Миниатюрные устройства УВЧ и СВЧ диапазонов на отрезках линий. – М.: Радио и связь, 1989. – 112 с.
17. *Бахвалова С.А., Романюк В.А.* Основы моделирования и проектирования радиотехнических устройств в Microwave Office: учебное пособие. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 152 с.
18. *Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А.* Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 496 с.
19. *Румянцев К.Е.* Прием и обработка сигналов: учеб. пособие. – М.: Академия, 2004. – 528 с.
20. *Колосовский Е.А.* Устройства приема и обработки сигналов: учеб. пособие. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 456 с.

REFERENCES

1. *Dinges S.I., Kochemasov V.N.* Ustroystva preobrazovaniya chastot [Frequency conversion devices], ed. by V.N. Kochemasova. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2020, 432 p.
2. *Maas S.A.* Microwave Mixers. Artech House, Norwood. MA. 1986, 368 p.
3. *Shchitov A.M. i dr.* Diodnye preobrazovateli chastoty dlya radioizmeritel'noy apparatury SVCh i KVCh diapazonov [Diode frequency converters for microwave and HF radio measuring equipment]. Nizhny. Novgorod, NGTU, 2016, 195 p.
4. Radioizmeritel'naya apparatura SVCh i KVCh. Uzlovaya i elementnaya baza / pod red. A.M. Kudryavtseva [Microwave and HF radio measuring equipment. Nodal and element base]. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 208 p.
5. *Klyuy A.A., Rumyantsev K.E.* Preobrazovateli chastoty: ucheb.-metod. posobie [Frequency converters: educational and methodical manual]. Taganrog: TRTU, 1996, 93 p.
6. Mikroelektronnye ustroystva SVCh: ucheb. posobie [Microelectronic microwave devices: a textbook], ed. by G.I. Veselova. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 280 p.
7. *Andrianov A.V., Zikiy A.N., Zlaman P.N.* Eksperimental'noe issledovanie smesitelya na mikroskheme LTC5553 [Experimental study of a mixer on an LTC5553 chip], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrotechnical and information complexes and systems], 2018, No. 1, Vol. 14, pp. 68-74.
8. *Zikiy A.N., Plenkin A.P.* Smesiteli detsimetrovogo diapazona na kombinatsii liniy peredachi [Decimeter range mixers on a combination of transmission lines], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2016, No. 3.
9. *Andrianov A.V., Zikiy A.N., Zlaman P.N.* Issledovanie dinamicheskogo diapazona smesitelya po kombinatsionnym sostavlyayushchim [Investigation of the dynamic range of the mixer by combination components], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems], 2017, No. 2, Vol. 14, pp. 74-78.
10. *Shaposhnikova Zh.V.* Nelineynye mnogochastotnye rezhimy tverdotel'nykh smesiteley SVCh diapazona: avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk [Nonlinear multi-frequency modes of solid-state microwave mixers: abstract cand. of phys. and math. sc. diss.]. Voronezh: VGU, 2011, 16 p.
11. *Sumin A.M.* Razrabotka metodik proektirovaniya preobrazovateley chastoty v integral'nom ispolnenii: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of methods for designing frequency converters in integrated design: abstract cand. of eng. sc. diss.]. Voronezh: VGU, 2012, 18 p.
12. *Chilikov A.A.* Modelirovanie i proektirovanie sverkhshirokopolosnykh diodnykh preobrazovateley chastoty dlya radioizmeritel'noy apparatury SVCh i KVCh – diapazonov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Modeling and design of ultra-wideband diode frequency converters for microwave and HF radio measuring equipment: cand. of phys. and math. sc. diss.]. Nizhny Novgorod, NNGU, 2021, 146 p.
13. Patent USA №4.739.519, Apr 19, 1988. Coplanar Microwave Balun, Multiplexer and Assemblies. Eugene C Findley, Sunnyvale, Calif.

14. Pribor dlya issledovaniya amplitudno-chastotnykh kharakteristik KH1-55. Tekhnicheskoe opisanie i instruksiya po ekspluatatsii 1.400.293TO [A device for studying the amplitude-frequency characteristics of X1-55. Technical description and operating instructions 1.400.293TO]. Moscow: Vneshtorgizdat, 2006, 196p.
15. Poluprovodnikovye pribory. SVCh diody. Spravochnik [Semiconductor devices. Microwave diodes. Handbook], ed.by B.A. Nalivayko. Tomsk: MGP «RASKO», 1992.
16. Zelyakh E.V., Fel'dshteyn A.L., Yavich L.R., Brilon V.S. Miniaturnye ustroystva UVCh i SVCh diapazonov na otrezkakh liniy [Miniature devices of UHF and microwave bands on line segments]. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 112 p.
17. Bakhvalova S.A., Romanyuk V.A. Osnovy modelirovaniya i proektirovaniya radiotekhnicheskikh ustroystv v Microwave Office: uchebnoe posobie [Fundamentals of modeling and design of radio engineering devices in Microwave Office: textbook]. Moscow: Solon-Press, 2016, 152 p.
18. Razevig V.D., Potapov Yu.V., Kurushin A.A. Proektirovanie SVCh-ustroystv s pomoshch'yu Microwave Office [Designing microwave devices using Microwave Office]. Moscow: Solon-Press, 2003, 496 p.
19. Rumyantsev K.E. Priem i obrabotka signalov: ucheb. posobie [Reception and signal processing: textbook]. Moscow: Akademiya, 2004, 528 p.
20. Kolosovskiy E.A. Ustroystva priema i obrabotki signalov: ucheb. posobie [Signal reception and processing devices: textbook]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2007, 456 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; тел.: 89185822295; к.т.н.; с.н.с.

Зламан Павел Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: fmymail@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185859324; ведущий инженер-конструктор научно-конструкторского бюро моделирующих и управляющих систем.

Помазанов Александр Васильевич – e-mail: avpomazanov@sfedu.ru; к.т.н., доцент кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем.

Zikiy Anatoly Nikolaevich – Taganrog Research Institute of Communications; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185822295; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Zlaman Pavel Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: fmymail@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185859324; leading design engineer of the Scientific design bureau of modeling and control system.

Pomazanov Aleksandr Vasilyevich – e-mail: avpomazanov@sfedu.ru; phone: +79515372080; cand. of eng. sc.; associate professor of department of information security of telecommunication systems.