

**Для цитирования:** Мирзаев З.Н., Гусейнов М.С., Айгумов Т.Г. Математическая модель смесителя с формированием противофазного сигнала гетеродина. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (3): 97-107 DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-97-107

**For citation:** Z.N. Mirzaev, M.S. Guseynov, T.G. Aigumov. Mathematical mixer model with formation of heterodyne anti-phase signal. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 97-107. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-97-107

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК.658.531.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-97-107

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СМЕСИТЕЛЯ С ФОРМИРОВАНИЕМ ПРОТИВОФАЗНОГО СИГНАЛА ГЕТЕРОДИНА

*Мирзаев З.Н., Гусейнов М.С., Айгумов Т.Г.*

*Дагестанский государственный технический университет  
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия*

**Резюме. Цель.** В статье рассматривается процесс расчета и проектирования смесителя с диплексором с формированием противофазного сигнала гетеродина целевым резонатором. **Метод.** Для расчета и оптимизации характеристик и конструктивно-топологических параметров смесителей использовались результаты проектирования полосового фильтра (ПФ) и фильтра нижних частот (ФНЧ) смесителей проходного типа. Расчет характеристик смесителя и его конструктивных элементов проведен с помощью пакета программ автоматизированного расчета СВЧ устройств «Serenade». Особенностью проектирования смесителей данной конструкции (с диплексором) является необходимость оптимизации топологии диплексера прежде, чем оптимизировать характеристики смесителя. **Результат.** Характеристики нелинейных искажений показывают, что максимальный уровень мощности на входе смесителя не должен превышать  $-15 - -20$  дБм для ослабления интермодуляционных искажений 3-го порядка не менее 50 дБс. Относительно малый уровень компрессии и подавления гармонических и интермодуляционных искажений связан с минимизацией при расчёте характеристик смесителей требуемого уровня мощности гетеродина ( $P_2 \sim 5 - 7$  дБм), что продиктовано минимальными затратами при реализации источников гетеродинных сигналов. Заметного улучшения характеристик смесителей по нелинейным искажениям можно достичь за счёт смещения рабочей точки на вольт-амперной характеристике (ВАХ) диодов внешним источником напряжения с одновременным увеличением  $P_2$  на несколько дБ (до  $P_2 = 10$  дБм). **Вывод.** Практически режим с повышенным уровнем подавления нелинейных искажений может быть реализован за счёт включения диодов через резистивно-емкостные цепи (автосмещение) или использование диодов с повышенным потенциальным барьером. Расчёт показывает, что возможна реализация достаточно малых потерь преобразования 6,6 – 8,0 дБ при невысоких уровнях  $P_2 \sim 5 - 7$  дБм.

**Ключевые слова:** смеситель, гетеродин, диплексор, микрополосковый

## MATHEMATICAL MIXER MODEL WITH FORMATION OF HETERODYNE ANTIPHASE SIGNAL

Z.N.Mirzaev, M.S.Guseynov, T.G.Aigumov  
Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

**Abstract Objectives** To carry out calculations involved in the design of a microwave mixer with a diplexer with the formation of the antiphase heterodyne signal using a slot resonator. **Method** In order to calculate and optimise the characteristics, design and topological parameters of microwave mixers, the results of the design bandpass filter PF and low-pass filter (LPF) mixers of through-feed type were used. The characteristics of mixers and their structural elements were calculated using the Serenade software package intended for the automated calculation of microwave devices. A distinct feature of designing mixers (with a diplexer) involves the need to optimise the topology of the diplexer before optimising the mixer characteristics. **Results** The characteristics of nonlinear distortions show that the maximum power level at the mixer inlet should not exceed  $-15 - -20$  dBm. In order to attenuate the intermodulation distortions of the 3rd order, this level should be higher than 50 dBs. The relatively low level of compression and suppression of harmonic and intermodulation distortions associated with the minimisation of the heterodyne power level at the calculation of characteristics of mixers of the required heterodyne power level ( $R_h \sim 5-7$  dBm) is due to the minimum expenses at the realisation of sources of heterodyne signals. A noticeable improvement in the characteristics of mixers by nonlinear distortions can be achieved by shifting the operating point at the points on the current-voltage characteristic (VAC) diodes by an external voltage source with a simultaneous increase in  $P_h$  by several dB (up to  $P_h = 10$  dBm). **Conclusion** A mode of increased nonlinear distortion suppression can be practically realised by switching on diodes through resistive-capacitive circuits (auto-shift) or using diodes with an increased potential barrier. The calculation shows that it is possible to realise sufficiently small conversion losses of 6.6-8.0 dB at low levels of  $R_h \sim 5-7$  dBm.

**Keywords:** mixer, heterodyne, diplexer, microstrip

**Введение.** С целью уменьшения потерь преобразования в смесителях, снижения требуемого уровня мощности гетеродина, уменьшения неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) предложено проектировать балансные смесители на бескорпусных диодах с барьером Шоттки (ДБШ) или диодных сборках как единый сверх высокочастотный (СВЧ) узел совместно с входными и выходными фильтрами [1-6, 11-14].

**Постановка задачи.** Алгоритм проектирования состоит в следующем:

1. Выбор общей конструкции смесителя.
2. Выбор структуры и расчет конструктивно-технологических параметров фильтров исходя из требуемых характеристик.
3. Оптимизация конструктивных элементов смесителя для достижения заданных параметров.

Конструкция балансного смесителя с диплексером в тракте входного сигнала показана на рис. 1. Входной СВЧ сигнал подается синфазно на диоды балансного смесителя через полосовой многозвенный фильтр.

Сигнал гетеродина через волноводно-щелевой переход возбуждает короткозамкнутую щелевую линию. К ее точкам, удаленным от короткозамкнутого конца на  $\lambda_r/4$ , подключены диоды. Входной полосовой фильтр (ПФ) и выходной ФНЧ образуют диплексер для развязки каналов смесителя.

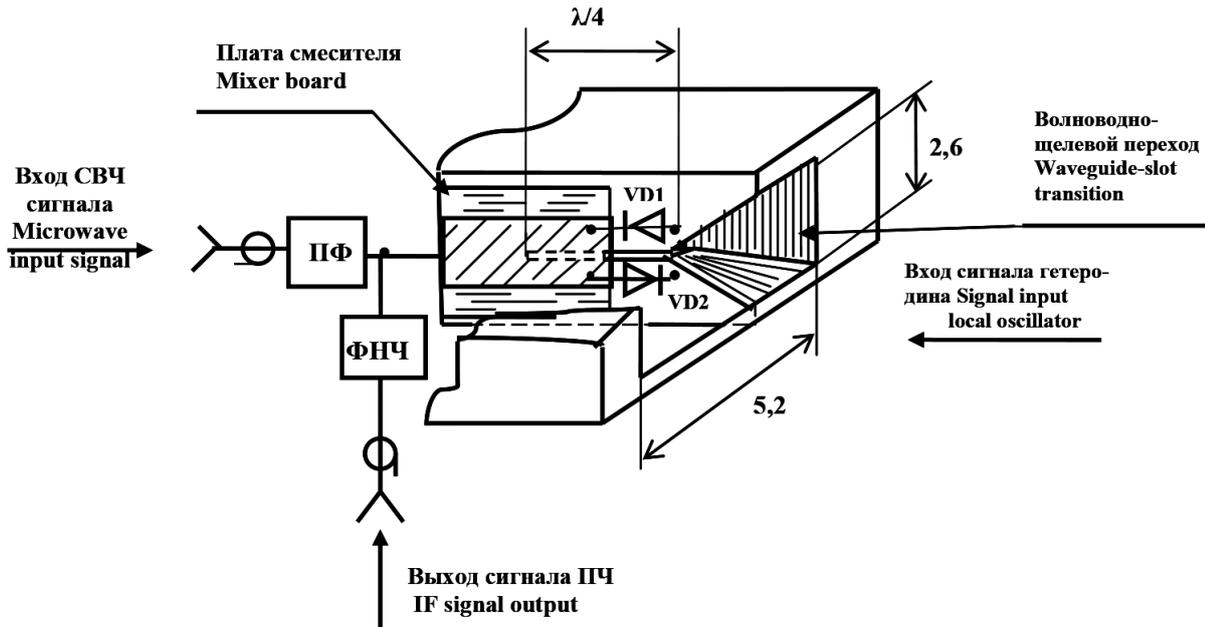


Рис. 1. Разрез конструкции смесителя с диплексером  
 Fig. 1. Section of the design of the mixer with a diplexer

**Методы исследования.** Для расчета и оптимизации характеристик и конструктивно-топологических параметров смесителей использовались результаты проектирования ПФ и ФНЧ смесителей проходного типа [7-10]. Особенностью проектирования смесителей данной конструкции (с диплексером) является необходимость оптимизации топологии диплексера прежде, чем оптимизировать характеристики смесителя. На рис. 2 представлена топология диплексера для смесителя 18-26 ГГц.

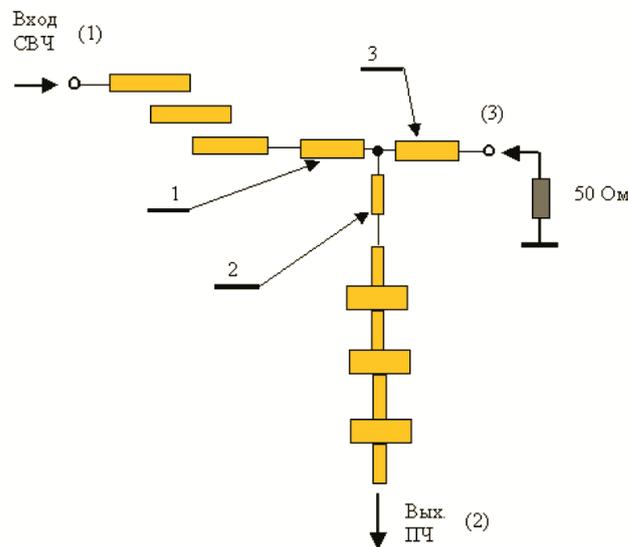


Рис. 2 Топология диплексера для смесителя 18-26 ГГц  
 Fig. 2 Diplexer topology for the 18-26 GHz mixer

Оптимизация диплексера заключается в отыскании оптимальных параметров (длины и ширины) отрезков МПЛ «1» и «2» для обеспечения следующих характеристик шестиполюсника:

- $|S_{31}| \approx 1$  дБ в диапазоне частот входного сигнала;
- $|S_{23}| \approx 1$  дБ в диапазоне ПЧ;
- $|S_{21}| > 40$  дБ в диапазонах входного сигнала и ПЧ;
- $|S_{13}|, |S_{23}| > 50$  дБ на частоте гетеродина.

После получения требуемых характеристик диплексера оптимизируется полная схема смесителя (рис. 3).

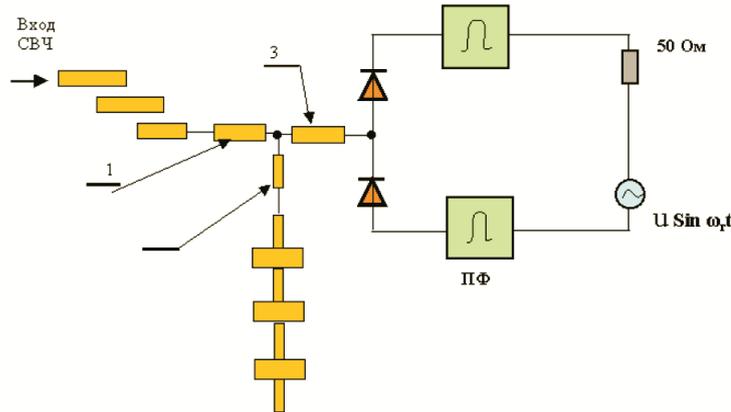


Рис. 3 Схема смесителя с диплексером  
 Fig. 3 Mixe circuit with diplexer

В процессе оптимизации варьируются параметры отрезков МПЛ «1», «2» и «3», а также параметры (длина и ширина) ближайших к точке подключения диодов элементов входного ПФ и выходного ФНЧ, для обеспечения минимальных потерь преобразования смесителя в рабочем диапазоне частот при минимальном ( $\approx 10$  дБм) уровне мощности гетеродина и с учетом обеспечения требуемых нелинейных и комбинационных искажений, требуемого ослабления по зеркальному и побочным каналам приема и высокой степени изоляции каналов смесителя [16-18].

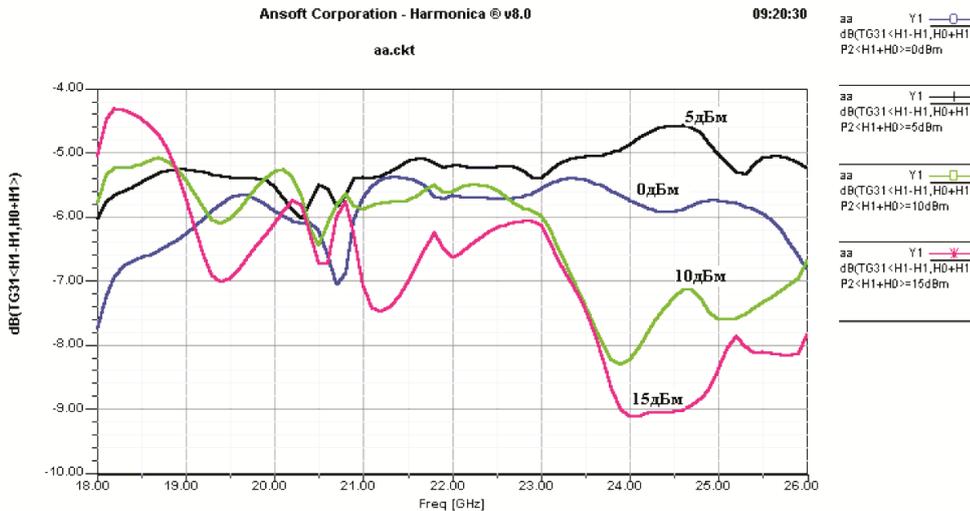


Рис. 4. Потери преобразования при различных  $P_r$ .  
 Fig. 4 Losses of conversion at different  $P_r$

**Обсуждение результатов.** На рис.4 приведены результаты расчета величины потерь преобразования от частоты при различных мощностях гетеродина ( $P_r = 0$  дБм, 5 дБм, 10 дБм, 15 дБм). Как следует из них, потери преобразования составляют: при  $P_r = 0$  дБм 5,4- 8 дБ; при  $P_r = 5$  дБм 5,5- 7 дБ; при  $P_r = 10$  дБм 5- 8,5 дБ; при  $P_r = 15$  дБм 4,4- 9,2 дБ;

Таким образом, минимальные и равномерные потери преобразования реализованы при мощности  $P_r = 5$  дБм и составляют не более 7 дБ. Неравномерность потерь преобразования при  $P_r = 5$  дБм не превышает  $\sim 3$  дБ во всем диапазоне частот (18-26 ГГц).

Уменьшение неравномерности потерь в диапазонах СВЧ и ПЧ сигналов было достигнуто за счет улучшения согласования по СВЧ входу [16]. Полученные значения потерь преобразования показывают, что разработанные устройства в диапазоне до 26 ГГц не уступают лучшим за-

рубежным образцам. На рис. 5, приведены результаты расчета, характеризующие степень подавления паразитного прохождения входного СВЧ сигнала на выходе ПЧ и сигнала ПЧ на входе (при  $P_r=5$ дБм).

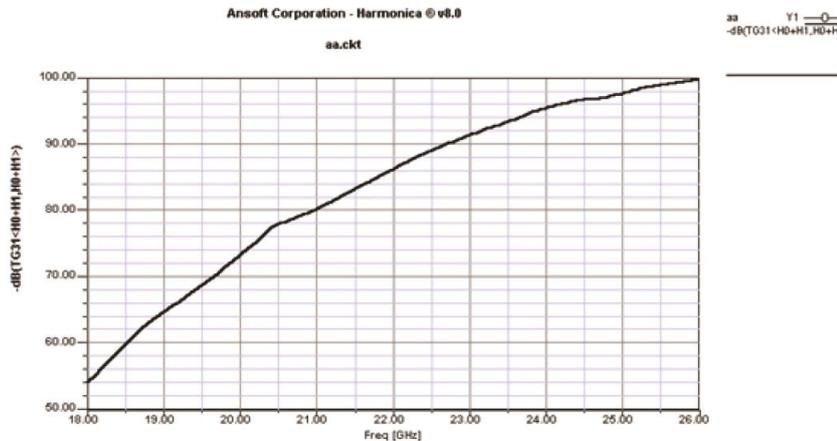


Рис. 5. Уровень ослабления входного СВЧ сигнала на выходе ПЧ (при  $P_r = 5$  дБм)  
Fig. 5. The attenuation level of the input microwave signal at the inverter output (at  $R_g = 5$  dBm)

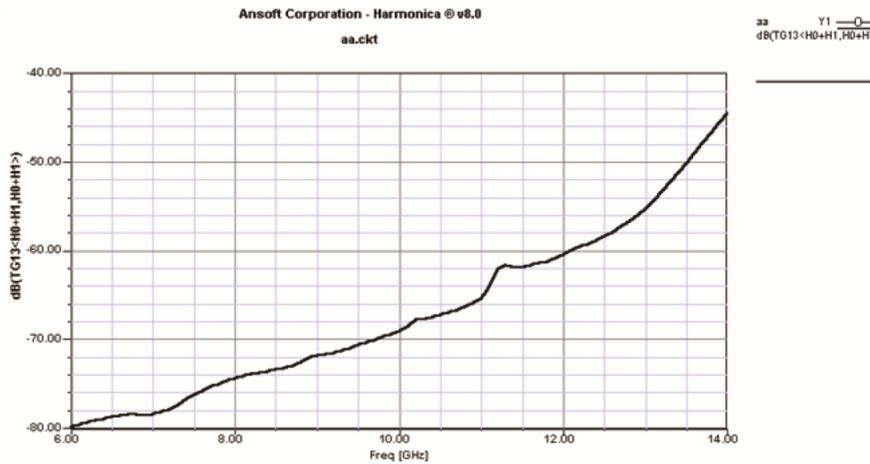
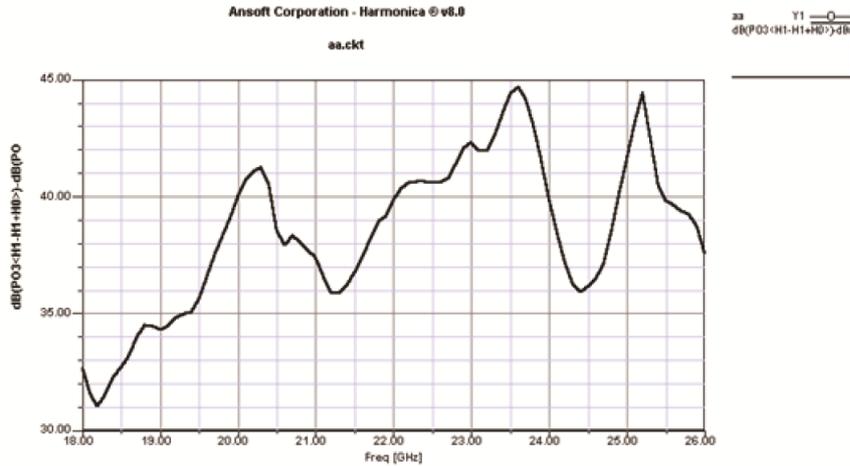


Рис. 6. Уровень ослабления сигнала ПЧ на СВЧ входе (при  $P_r = 5$  дБм)  
Fig. 6. The attenuation level of the IF signal at the microwave input (at  $R_g = 5$  dBm)

Уровень ослабления входного СВЧ сигнала во всем диапазоне частот входного сигнала (18-26 ГГц) составляет -55- -100дБ. Уровень ослабления сигнала ПЧ на СВЧ входе в диапазоне частот сигнала ПЧ (6-14ГГц) составляет -45- -90дБ.

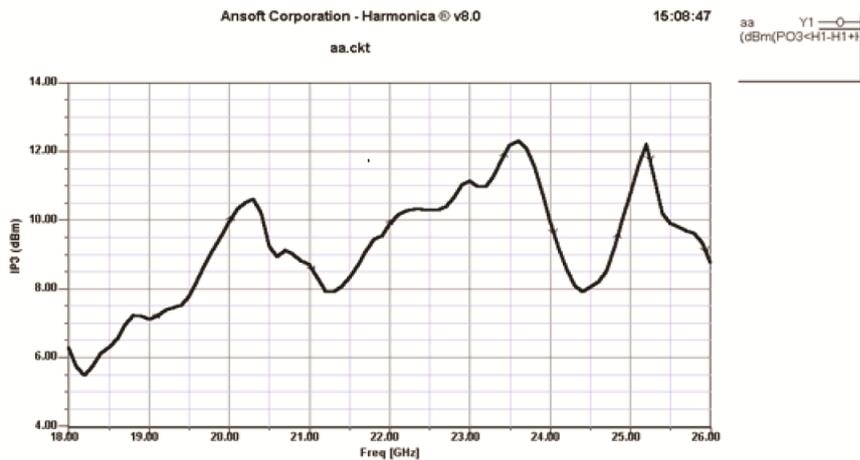
Такие значения уровня ослабления сигнала, приложенного к какому либо входу, на другие выводы, связаны с тем, что диоды препятствуют прохождению СВЧ сигнала из одного работающего канала в другой за счет собственного потенциального барьера, поскольку диоды, работающие при нулевом смещении в работающих каналах открываются на короткий промежуток времени сформированным импульсом, а в отсутствие импульса СВЧ сигнала, в виду его малой амплитуды, не в состоянии открыть диод. По полученному значению ослабления можно сказать, что смеситель является балансным [5-8]. На рис.7, приведены результаты расчета уровня подавления интермодуляционных составляющих 3-го порядка (при  $P_r = 5$ дБм,  $P_{c1,c2} = -10$ дБм) и зависимость IP3 от частоты.



**Рис.7. Уровень подавления интермодуляционных составляющих 3-го порядка (при  $P_r = 5$  дБм,  $P_{c1}, c2 = -10$  дБм)**

**Fig. 7. Level of suppression of intermodulation components of the 3rd order (at  $P_r = 5$  dBm,  $P_{c1}, c2 = -10$  dBm)**

Уровень подавления IP3 составляет 33-45дБ, при этом мощность интермодуляционных составляющих IP3 изменяется в пределах 5,5-12,5дБм. Величина IP3 определяется при номинальном уровне  $P_r = 5$ дБм (рис. 8).



**Рис. 8. Зависимость  $IP_3$**

**Fig. 8. Dependence  $IP_3$**

Уровень составляющих третьего порядка равен уровню основного выходного сигнала прямого преобразования. Верхний предел динамического диапазона смесителя определяется уровнем интермодуляционных составляющих.

Характеристики показывают, что максимальный уровень мощности на входе смесителя не должен превышать -15- -20дБм для ослабления интермодуляционных искажений третьего порядка не менее 50дБс.

На рис. 9, приведены результаты расчета уровня ослабления зеркального и суммарного каналов. Здесь видно, что уровень ослабления зеркального канала  $f_{зк} = 2f_r - f_c$ , где  $f_{пч} = f_{зк} - f_r$  составляет 75-100дБ в диапазоне 38-41ГГц, 30-40дБ в диапазоне 42-43 ГГц и 70-180дБ в диапазоне 44-46ГГц.

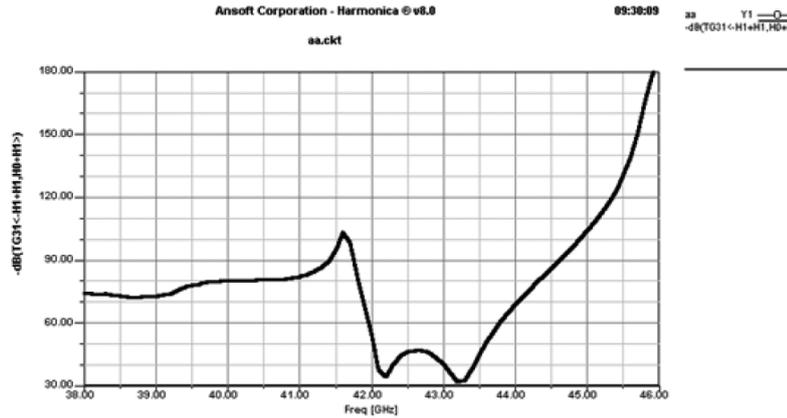


Рис. 9. Относительный уровень ослабления зеркального канала  $f_{\Sigma k} = 2f_{\Gamma} - f_c$ , где  $f_{\text{пч}} = f_{\Sigma k} - f_{\Gamma}$   
 Fig. 9. The relative level of attenuation of the mirror channel  $f_{zk} = 2f_g - f_s$ , where  $f_{pч} = f_{zk} - f_g$

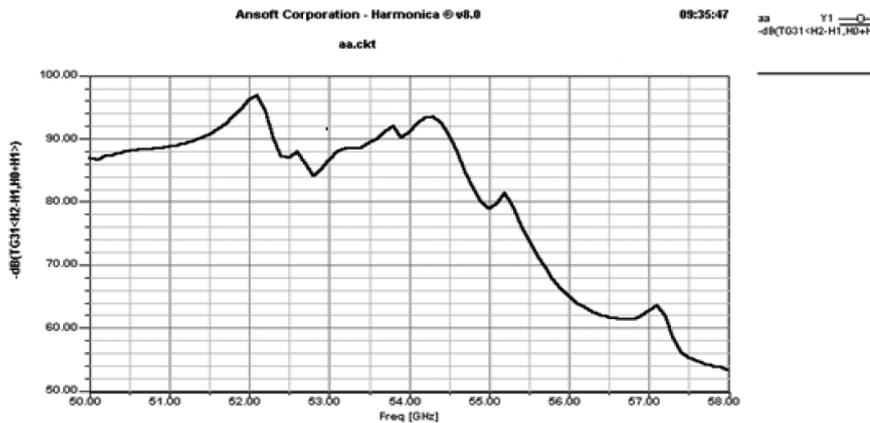


Рис. 10. Уровень ослабления суммарного канала  $f_{\Sigma k} = f_{\Gamma} + f_c$ , где  $f_{\text{пч}} = 2f_{\Gamma} - f_{\Sigma k}$   
 Fig. 10. The attenuation level of the total channel  $f_{\Sigma k} = f_g + f_s$ , where  $f_{pч} = 2f_g - f_{\Sigma k}$

Уровень ослабления суммарного канала  $f_{\Sigma k} = f_{\Gamma} + f_c$ , где  $f_{\text{пч}} = f_{\Gamma} - f_{\Sigma k}$  составляет 65-95 дБ в диапазоне 50-56 ГГц и 55-65 дБ в диапазоне 56-58 ГГц. Недостаточное ослабление зеркального канала 30-40 дБ наблюдается на тех участках диапазона частот, где входные МШУ внесут дополнительные потери не менее 30 дБ (рис. 10).

На рис. 11 показаны результаты расчета коэффициента преобразования и коэффициента отражения в диапазоне частот 18-26 ГГц.

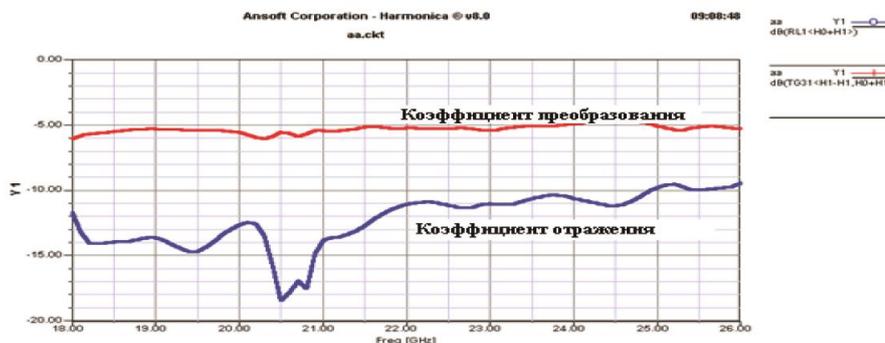


Рис. 11. Коэффициент преобразования и коэффициент отражения в диапазоне частот 18-26 ГГц  
 Fig. 11. The conversion coefficient and reflection coefficient in the frequency range 18-26 GHz

Результаты показывают, что неравномерность коэффициента преобразования  $K_p = 10 \lg P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$  в диапазоне частот 18-26 ГГц не превышает  $\pm 1$ дБ. Коэффициент преобразования смесителя прямо пропорционален его коэффициенту передачи. На рис. 12 и показаны результаты расчета уровня компрессии (1дБ) при  $P_r = 5$ дБм.

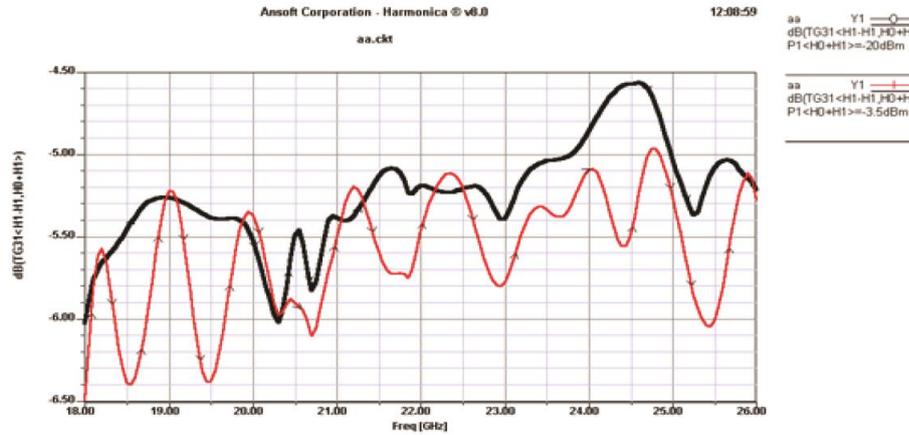


Рис. 12. Уровень компрессии (1дБ) при  $P_r = 5$ дБм.  
 Fig. 12. The level of compression (1dB) at  $R_g = 5$ dBm.

Здесь уровень компрессии достигается при уровне входного сигнала  $P_c = -3,5$ дБм. Поэтому смесители используются при уровнях сигнала меньших точки компрессии, так как дополнительно к искажению входного сигнала увеличивается амплитуда побочных спектральных составляющих. Также верхний предел динамического диапазона смесителя определяется уровнем компрессии. Относительно малый уровень компрессии связан с минимизацией при расчете характеристик смесителей требуемого уровня мощности гетеродина ( $P_r = 5$ дБм), что продиктовано минимальными затратами при реализации источников гетеродинных сигналов [19-20]. На рис.13 приведены результаты расчета уровня гармонических искажений  $f_{\text{пч(параз)}} = 2(f_g - f_c)$  при неидентичности параметров диодов равен 5%. По результатам расчета можно сказать, что уровень гармонических искажений в диапазоне 18-23 ГГц составляет 140-180 дБ, а в диапазоне 23-26 ГГц составляет 50-140 дБ. Столь малый уровень гармонических искажений достигается смещением рабочей точки на ВАХ диодов внешним источником напряжения с одновременным увеличением  $P_r$  на несколько дБ.

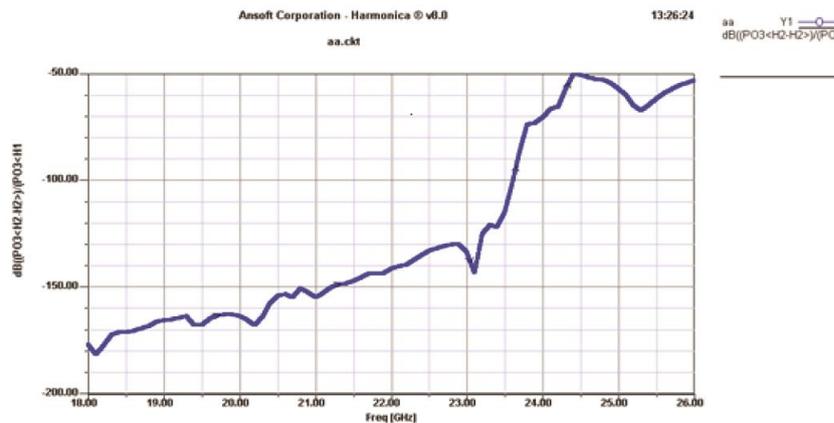


Рис. 13. Уровень гармонических искажений  $f_{\text{пч(параз)}} = 2(f_g - f_c)$  (при неидентичности параметров диодов 5%).  
 Fig. 13. The level of harmonic distortion  $f_{\text{pch( paras.)}} = 2(f_g - f_c)$  (with non-identical parameters of the diodes 5%).

Расчёт показывает, что возможна реализация достаточно малых потерь преобразования 6,6 – 8,0 дБ (с учётом ослабления в ПФ и ФНЧ) при невысоких уровнях  $P_{г\sim}$  5 – 7 дБм.

Расчётная неравномерность АЧХ в полосе 40 мГц не превышает 0,1 – 0,15 дБ. Недостаточное ослабление побочных каналов приёма 20 – 30 дБ наблюдается только в тех участках диапазона частот, где входные МШУ внесут дополнительные потери не менее 30 дБ.

Характеристики нелинейных искажений показывают, что максимальный уровень мощности на входе смесителя не должен превышать -15 – -20 дБм для ослабления интермодуляционных искажений 3-го порядка не менее 50 дБс.

**Вывод.** Относительно малый уровень компрессии и подавления гармонических и интермодуляционных искажений связан с минимизацией при расчёте характеристик смесителей требуемого уровня мощности гетеродина ( $P_{г\sim}$  5 – 7 дБм), что продиктовано минимальными затратами при реализации источников гетеродинных сигналов.

Заметного улучшения характеристик смесителей по нелинейным искажениям можно достичь за счёт смещения рабочей точки на ВАХ диодов внешним источником напряжения с одновременным увеличением  $P_{г}$  на несколько дБ (до  $P_{г}= 10$  дБм).

Практически режим с повышенным уровнем подавления нелинейных искажений может быть реализован за счёт включения диодов через резистивно-емкостные цепи (автосмещение) или использование диодов с повышенным потенциальным барьером.

#### Библиографический список:

1. Щитов А.М., Мирзаев З.Н., Исаев М.Д. Расчет и проектирование смесителя с дуплексором 18-26 ГГц // Вестник Воронежского государственного технического университета . 2010. Т.6, № 11. С. 119-122.
2. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств Под ред. В.И. Вольмана. –М.: Радио и связь, 1982.-328.
3. Тагилаев А.Р., Исаев М.Д., Мирзаев З.Н. Высокочастотный балансный модулятор с высоким подавлением несущей частоты. Радиотехника, 2011, № 10, С. 45-47.
4. Мирзаев З.Н., Щитов А.М., Гусейнов М.С. Широкополосный балансный удвоитель частоты миллиметрового диапазона (26-40ГГц) // Вестник Воронежского государственного технического университета. –Воронеж: ВГТУ, 2011. Т.7, № 11. С. 170-174.
5. Щитов А.М., Мирзаев З.Н., Исаев М.Д. Расчет и проектирование смесителя проходного типа 18-26 ГГц // Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж: ВГТУ, 2010. Т.6, № 11. С. 119-122.
6. Гусейнов М.С., Мирзаев З.Н., Щитов А.М. Расчет широкополосного полосно-пропускающего фильтра (12-19,2 ГГц) с короткозамкнутыми четвертьволновыми шлейфами // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала: ДГТУ, 2011. №21. С. 16–21.
7. Гусейнов М.С., Мирзаев З.Н. Широкополосный балансный умножитель частоты на связанных микрополосковых линиях передачи // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала: ДГТУ, 2010. №19. С. 7-11.
8. Мирзаев З.Н., Исаев М.Д. Расчет параметров микрополосковых полосовых фильтров на связанных линиях // Сборник научных трудов кафедры микроэлектроники.– Махачкала: тип. ИП Тагиева Р.Х., 2011. Вып.1. С.36-40.
9. Мирзаев З.Н., Гусейнов М.С. Расчет широкополосных согласующих цепей лестничной структуры (статья) // Исследование, разработка и применение средств радиоэлектроники, телекоммуникаций и информационных систем в промышленности: матер. Всерос. науч.-тех. конф. Махачкала: ДГТУ, 2011. С. 105-108.
10. Мирзаев З.Н., Гусейнов М.С. Расчет элементов широкополосной согласующей цепи в диапазоне 4-6,4 ГГц (статья) // Исследование, разработка и применение средств радиоэлектроники, телекоммуникаций и информационных систем в промышленности: матер. Всерос. науч.-тех. конф. Махачкала: ДГТУ, 2011. С. 90-94.
11. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства . Каталог НИИПИ «Кварц», Н. Новгород, 2002 г.
12. Харкевич А.А. Нелинейные и параметрические явления в радиотехнике. — М.: Гос-техиздат, 1956. - 184 с.
13. Григулевич В.И., Иммореев И.Я. Радиоимпульсное преобразование частоты. М.: Сов. радио, 1966, 335 с.
14. Хотунцев Ю.Л. Полупроводниковые СВЧ устройства. - М.: Связь, 1978. - 256с.
15. Петров Б.Е. Спектральный анализ в применении к нелинейной колебательной системе. - Радиотехника, 1964, т. 19, №7, с.3-12.
16. Петров Б.Е. КПД варакторных умножителей частоты с холостым контуром, настроенным на вторую гармонику. - В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение, под ред. Я.А. Федотова, вып.20. М.: Сов радио, 1968, с.356-366.

17. Пильдон В.И., Визель А.А. Полупроводниковые диоды для умножения частоты. - В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение. Под ред. Я.А. Федотова. - М.: Сов.радио, 1970, вып.23, с.82-108.
18. Жаботинский М.Е., Свердлов Ю.Л. Основы теории и техники умножения частоты. -М.: Сов. радио, 1964,327 с.
19. Ризкин И.Х. Умножители и делители частоты. - М.: Связь, 1976. - 326 с.
20. Буторин Е.Н., Корж В.И., Крушгаа Е.Б. О времени восстановления обратной проводимости умножительных диодов.- Радиотехника, 1972, т. 27, № 6, с.65-68.

#### References:

1. . Shchitov A.M., Mirzayev Z.N., Isayev M.D. Raschet i proyektirovaniye smesitelya s dipleksorom 18-26 GGts // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta . - 2010. -Т.6, № 11. -S. 119-122. [Shchitov A.M., Mirzaev Z.N., Isaev M.D. Vol.6, No. 11. pp. 119-122. (In Russ)]
2. Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCH poloskovykh ustroystv Pod red. V.I. Vol'mana. -М.: Radio i svyaz', 1982.-328. [Reference for the calculation and design of microwave strip devices Ed. IN AND. Wolman. -M .: Radio and communications, 1982. 328. (In Russ)]
3. Tagilayev A.R., Isayev M.D., Mirzayev Z.N. Vysokochastotnyy balansnyy modulya-tor s vysokim podavleniyem nesushchey chastoty. Radiotekhnika, 2011, № 10,С. 45-47. [Tagilayev A.R., Isaev M.D., Mirzaev Z.N. High-frequency balanced modulator with high carrier frequency suppression. Radio Engineering, 2011, No. 10, C. 45-47. (In Russ)]
4. Mirzayev Z.N., Shchitov A.M., Guseynov M.S. Shirokopolosnyy balansnyy udvoi-tel' chastoty millimetrovogo diapazona (26-40GGts) // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. -Voronezh: VGTU, 2011. Т.7, № 11. S. 170-174. [Mirzaev Z.N., Shchitov A.M., Guseinov M.S. Broadband balanced doubler of frequency of the millimeter range (26-40 GHz) // Bulletin of the Voronezh State Technical University. -Voronezh: VSTU, 2011. Vol.7, No. 11. pp. 170-174. (In Russ)]
5. Shchitov A.M., Mirzayev Z.N., Isayev M.D. Raschet i proyektirovaniye smesitelya pro-khodnogo tipa 18-26 GGts // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. -Voronezh: VGTU, 2010. -Т.6, № 11. - S. 119-122. [Shchitov A.M., Mirzaev Z.N., Isaev M.D. Calculation and design of the mixer of the pass-through type 18-26 GHz // Bulletin of the Voronezh State Technical University. -Voronezh: VSTU, 2010. -Т.6, No. 11. -S. 119-122. (In Russ)]
6. Guseynov M.S., Mirzayev Z.N., Shchitov A.M. Raschet shirokopolosnogo polosno-propuskayushchego fil'tra (12-19,2 GGts) s korotkozamknutymi chetvert'volnovymi shleyfami // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. -Makhachkala: DGTU, 2011.-№21. - S. 16-21. [Guseinov M.S., Mirzaev Z.N., Shchitov A.M. Calculation of a broadband bandpass filter (12-19.2 GHz) with short-circuited quarter-wave loops // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. -Makhachkala: DGTU, 2011. №21. pp. 16-21. (In Russ)]
7. Guseynov M.S., Mirzayev Z.N. Shirokopolosnyy balansnyy umnozhitel' chastoty na svyazannykh mikropoloskovykh liniyakh peredachi // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. - Makhachkala: DGTU, 2010. -№19. - S. 7-11. [Huseynov MS, Mirzaev Z.N. Broadband balanced frequency multiplier on coupled microstrip transmission lines // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. - Makhachkala: DSTU, 2010. No.19. pp. 7-11(In Russ)]
8. Mirzayev Z.N., Isayev M.D. Raschet parametrov mikropoloskovykh polosovykh fil'trov na svyazannykh liniyakh // Sbornik nauchnykh trudov kafedry mikroelektroniki.- Makhachkala: tip. IP Tagiyeva R.KH., 2011. - Vyp.1.-S.36-40. [Mirzaev Z.N., Isaev M.D. Calculation of the parameters of microstrip bandpass filters on connected lines // Collection of scientific papers of the Department of Microelectronics.- Makhachkala: typ. IP Tagiev R.Kh., 2011. Issue 1, pp. 36-40. (In Russ)]
9. Mirzayev Z.N., Guseynov M.S. Raschet shirokopolosnykh soglasuyushchikh tsepey lestnichnoy struktury (stat'ya) // Issledovaniye, razrabotka i primeneniye sredstv radioelektroniki, telekommunikatsiy i informatsionnykh sistem v promyshlennosti: mater. Vseros. nauch.-tekh. konf. - Makhachkala: DGTU, 2011. - S. 105-108. [Mirzaev Z.N., Huseynov M.S. The calculation of the broadband matching chains of the staircase structure (article) // Research, development and application of radio electronics, telecommunications and information systems in industry: Mater. Vseros. scientific conf. Makhachkala: DGTU, 2011, pp. 105-108. (In Russ)]
10. Mirzayev Z.N., Guseynov M.S. Raschet elementov shirokopolosnoy soglasuyushchey tsepi v diapazone 4-6,4 GGts (stat'ya) // Issledovaniye, razrabotka i primeneniye sredstv radioelektroniki, telekommunikatsiy i informatsionnykh sistem v promyshlennosti: mater. Vseros. nauch.-tekh. konf. - Makhachkala: DGTU, 2011.- S. 90-94. [Mirzaev Z.N., Huseynov M.S. Calculation of elements of a broadband matching circuit in the range of 4-6.4 GHz (article) // Research, development and application of radio electronics, telecommunications and information systems in industry: Mater. Vseros. scientific conf. Makhachkala: DSTU, 2011, pp. 90-94(In Russ)]
11. Koaksial'nyye, volnovodnyye i opticheskiye ustroystva -Katalog NNPI «Kvarts», N. Novgorod, 2002 g. [Coaxial, waveguide and optical devices - Catalog of NNPI "Quartz", N. Novgorod, 2002 (In Russ)]
12. Kharkevich A.A. Nelineynyye i parametricheskkiye yavleniya v radiotekhnike. M.: Gos-tekhizdat, 1956. - 184 s. [Kharkevich A.A. Nonlinear and parametric phenomena in radio engineering. M .: Gos-tekhizdat, 1956. 184 p. (In Russ)]

13. Grigulevich V.I., Immoreyev I.Ya. Radioimpul'snoye preobrazovaniye chastoty. M.:Sov.radio, 1966, 335 s. [Grigulevich V.I., Immoreyev I.Ya. Radio pulse frequency conversion. M.: Sov.radio, 1966, 335 p. (In Russ)]
14. Khotuntsev YU.L. Poluprovodnikovyye SVCH ustroystva. - M.: Svyaz', 1978. 256s. [Khotuntsev Yu.L. Semiconductor microwave devices. - M.: Communication, 1978. 256p. (In Russ)]
15. Petrov B.Ye. Spektral'nyy analiz v primeneni k nelineynoy kolebatel'noy sisteme. Radiotekhnika, 1964, t. 19, №7, s.3-12. [Petrov B.E. Spectral analysis as applied to a nonlinear oscillatory system. Radio engineering, 1964, t. 19, No. 7, pp. 3-12. (In Russ)]
16. Petrov B.Ye. KPD varaktornnykh umnozhitel'nykh chastoty s kholostym konturom, nastroyennym na vtoruyu garmoniku. - V kn.: Poluprovodnikovyye pribory i ikh primeneniye, pod red. YA.A. Fedotova, vyp.20. M.: Sov radio, 1968, s.356-366. [Petrov B.E. Efficiency of varactor frequency multipliers with an idle circuit tuned to the second harmonic. - In the book: Semiconductor devices and their use, ed. Ya.A. Fedotova, issue 20. M.: Radio Owls, 1968, p. 356-366. (In Russ)]
17. Pil'don V.I., Vizel' A.A. Poluprovodnikovyye diody dlya umnozheniya chastoty. - V kn.: Poluprovodnikovyye pribory i ikh primeneniye. Pod red. YA.A. Fedotova. - M.: Sov.radio, 1970, vyp.23, s.82-108. [Pildon V.I., Wiesel A.A. Semiconductor diodes for frequency multiplication. - In the book: Semiconductor devices and their application. Ed. Ya.A. Fedotova. - M.: Sov.radio, 1970, Issue 23, pp. 82-108. (In Russ)]
18. Zhabotinskiy M.Ye., Sverdlov YU.L. Osnovy teorii i tekhniki umnozheniya chastoty. -M.: Sov. radio., 1964,327 s. [Jabotinsky M.E., Sverdlov Yu.L. Fundamentals of the theory and techniques of frequency multiplication. M.: Sov. radio., 1964.327 p. (In Russ)]
19. Rizkin I.Kh. Umnozhiteli i deliteli chastoty. - M.: Svyaz', 1976. 326 s. [Rizkin I.Kh. Multipliers and frequency dividers. - M.: Communication, 1976. 326 p. (In Russ)]
20. Butorin E.H., Korzh V.I., Krushgaa Ye.B. O vremeni vosstanovleniya obratnoy provodimosti umnozhitel'nykh diodov.- Radiotekhnika, 1972, t. 27, № 6, s.65-68. [Butorin E.H., Korzh V.I., Krushgaa E.B. On the recovery time of the reverse conductivity of multiplier diodes. Radio Engineering, 1972, Vol. 27, No. 6, pp. 65-68. (In Russ)]

#### **Сведения об авторах:**

Мирзаев Зайнудин Нурмагомедович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; e-mail:[zainu73@mail.ru](mailto:zainu73@mail.ru)

Гусейнов Мурад Саидович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; e-mail: [murad.gusejnov@mail.ru](mailto:murad.gusejnov@mail.ru)

Айгумов Тимур Гаджиевич, кандидат экономических наук, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; e-mail: [915533@mail.ru](mailto:915533@mail.ru)

#### **Information about the authors.**

Zainudin N.Mirzaev, Cand. Sci., (Technical), Senior Lecturer, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; e-mail:[zainu73@mail.ru](mailto:zainu73@mail.ru)

Murad S.Guseynov, Cand. Sci., (Technical), Assoc. Prof., Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; e-mail: [murad.gusejnov@mail.ru](mailto:murad.gusejnov@mail.ru)

Timur G.Aigumov, Cand. Sci. (Economics), Head of the Department of Computer Software and Automated Systems. e-mail: [915533@mail.ru](mailto:915533@mail.ru)

#### **Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.06.2019.

Принята в печать 29.08.2019.

#### **Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

Received 26.06.2019.

Accepted for publication 29.08.2019.