

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ СМЕСИТЕЛЕЙ

Л. И. Аверина*, А. М. Бобрешов*, Ж. В. Шапошникова**

*Воронежский государственный университет

**ОАО «Концерн «Созвездие»

Поступила в редакцию 10.03.2011 г.

Аннотация. Разработана методика расчёта коэффициента шума смесителя на основе метода конверсионных матриц. Рассмотрены основные источники собственных шумов в СВЧ смесителях. Рассчитаны шумовые характеристики разных типов смесителей в зависимости от режима работы и уровня подаваемого гетеродина.

Ключевые слова: смеситель, коэффициент шума, метод конверсионных матриц, тепловой шум, дробовой шум.

Abstract. The method of noise figure calculation in mixers using conversion matrix was developed. The main sources of own noise in high-frequency mixers were considered. The noise characteristics of different mixers against bias point and oscillator level were account.

Keywords: Mixer, noise figure, method of conversion matrix, thermal noise, shot noise

ВВЕДЕНИЕ

Одним из показателей качества работы радиоприёмной системы является её коэффициент шума. Для многокаскадной структуры он определяется формулой Фриисса [1]:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \frac{F_3 - 1}{K_1 K_2} + \dots, \quad (1)$$

где F_i , K_i — коэффициенты шума и передачи (усиления) каскадов. Для супергетеродинного приёмника в формуле (1) F_1 , K_1 — коэффициенты шума и коэффициент усиления малошумящего усилителя (МШУ), F_2 , K_2 — коэффициент шума и коэффициент передачи смесителя, F_3 — коэффициент шума последующего каскада. Из этого выражения видно, что шумами смесителя можно пренебречь, только если коэффициент усиления МШУ достаточно высок. Однако, для уменьшения различных нелинейных эффектов, возникающих в радиоприёмном тракте, коэффициент усиления входного усилителя выбирают небольшим [2], лишь достаточным для компенсации потерь, вносимых последующими каскадами. Поэтому при расчёте коэффициента шума приёмника необ-

ходимо учитывать как коэффициент шума МШУ, так и смесителя.

В настоящее время в СВЧ устройствах используются различные типы смесителей: как активные — на полевых и биполярных транзисторах, так и пассивные — на диодах и полевых транзисторах, работающих при нулевом питании на стоке. Собственные шумы в них имеют разную физическую природу и статистические характеристики. К тому же смеситель исходно является нелинейным устройством, осуществляющим преобразование сигнала с одной частоты на другую. Всё это усложняет расчёт его коэффициента шума.

Поэтому в работе ставилась задача разработать единую методику расчёта коэффициента шума СВЧ смесителей и на её основе проанализировать шумовые свойства разных типов устройств.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА СМЕСИТЕЛЯ

Как известно, смесители обычно работают в режиме существенной нелинейности по гетеродинному входу, что требует для анализа любого сигнального или шумового воздействия решения системы нелинейных дифференциаль-

© Аверина Л.И., Бобрешов А.М., Шапошникова Ж. В. 2011

ных уравнений для схемы нелинейной цепи (модели), эквивалентной смесителю тракту. Модель смесителя содержит ряд линейных и нелинейных элементов, находящихся под действием управляющих колебаний, приложенных в общем случае к различным входам.

Однако, если одно из воздействующих на смеситель колебаний существенно превосходит остальные (обычно это колебание гетеродина), то нелинейную цепь можно заменить линейной с параметрами, являющимися функциями известного управляющего колебания, т.е. функциями времени. Например, для нелинейной проводимости и ёмкости связь малосигнальных напряжений и токов будет выглядеть следующим образом:

$$u(t) = g(t)i(t),$$

$$i(t) = c(t) \frac{du(t)}{dt} + u(t) \frac{dc(t)}{dt}.$$

Если гетеродин является гармоническим колебанием, то коэффициенты передаточных характеристик ($g(t)$, $c(t)$) раскладываются в ряд Фурье по гармоникам гетеродина. Решение для токов и напряжений при этом ищется в виде суммы гармонических составляющих на частотах:

$$k\omega_{\Gamma} + \omega_{\text{пч}}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm K,$$

ω_{Γ} — частота гетеродина, $\omega_{\text{пч}}$ — промежуточная частота, на которую происходит преобразование сигнала, K — количество учитываемых при анализе гармоник гетеродина. Этот метод расчёта называется методом конверсионных матриц [3].

Рассмотрим возможность применения этого метода для анализа шумовых свойств смесителя. Во-первых, так как уровень собственного шума в устройстве много меньше уровня гетеродина, то при анализе можно свести нелинейную систему к линейной параметрической. Во-вторых, шум в смесителях имеет либо тепловую, либо дробовую природу. Значит его можно считать белым гауссовским шумом с постоянной спектральной плотностью и представить в виде суммы гармонических составляющих со случайными амплитудами и фазами [1]. (Здесь мы не учитываем низкочастотный фликкер-шум, который отфильтровывается в СВЧ устройствах.) Тогда для расчёта изменения каждой гармонической составляющей шума при прохождении через смеситель можно воспользоваться методом конверсионных матриц.

Коэффициент шума смесителя определяется соотношением:

$$F_{\text{см}} = 1 + \frac{P_{\text{вых}}^{\text{сш}}}{P_{\text{вых}}^{\text{ис}}},$$

где $P_{\text{вых}}^{\text{сш}}$ — мощность собственных шумов на выходе устройства, $P_{\text{вых}}^{\text{ис}}$ — мощность шумов сопротивления источника сигнала на выходе. Мощности определяются как произведения соответствующих спектральных плотностей на полосу пропускания смесителя. Если в устройстве несколько некоррелированных источников собственных шумов, то их общая спектральная плотность на выходе определяется как сумма спектральных плотностей на выходе от отдельных источников. Для коррелированных источников необходимо ещё учесть взаимную спектральную плотность [1].

При расчёте коэффициента шума смесителя интересуют только те частотные составляющие шума на входе, которые в результате преобразования на выходе попадут на промежуточную частоту $\omega_{\text{пч}}$. Это составляющие шума на частотах $k\omega_{\Gamma} + \omega_{\text{пч}}$ с амплитудами $I_k^{\text{вх}}$. Каждая из этих составляющих с помощью коэффициента передачи H_k преобразуется на выходе на частоту $\omega_{\text{пч}}$. (H_k для конкретной схемы и входа включения шумового источника находят с помощью метода конверсионных матриц.) Тогда амплитуда выходного шумового сигнала на промежуточной частоте:

$$I_{\text{вых}} = \sum_{k=-K}^K I_k^{\text{вх}} H_k.$$

Применяя среднеквадратичное усреднение, определяющее спектральную плотность шума, получим:

$$\langle I_{\text{вых}} I_{\text{вых}}^* \rangle = \sum_{k_1=-K}^K \sum_{k_2=-K}^K \langle I_{k_1}^{\text{вх}} I_{k_2}^{*\text{вх}} \rangle H_{k_1} H_{k_2}^*.$$

Если источник шума линеен, то его различные частотные составляющие на входе не коррелируют между собой, и для него будет выполняться следующее соотношение:

$$\langle I_{\text{вых}} I_{\text{вых}}^* \rangle = \langle I_{\text{вх}} I_{\text{вх}}^* \rangle \sum_{k=-K}^K H_k H_k^*. \quad (2)$$

Если же источник шума нелинеен, то его частотные компоненты коррелированы между собой, причём [4]:

$$\langle I_{k_1}^{\text{вх}} I_{k_2}^{*\text{вх}} \rangle = 4kTG_{k_1-k_2} \quad (3)$$

для теплового шума нелинейной проводимости G ,

$$\langle I_{k1}^{вх} I_{k2}^{*вх} \rangle = 2qI_{k1-k2} \quad (4)$$

для дробового шума нелинейного тока I . Здесь k — постоянная Больцмана, q — заряд электрона, T — температура, G_{k1-k2} , I_{k1-k2} — Фурье-компоненты проводимости и тока. Для таких источников шума спектральная плотность на выходе будет определяться соотношениями:

$$\langle I_{вых} I_{вых}^* \rangle = 4kT \sum_{k1=-K}^K \sum_{k2=-K}^K G_{k1-k2} H_{k1} H_{k2}^*$$

или

$$\langle I_{вых} I_{вых}^* \rangle = 2q \sum_{k1=-K}^K \sum_{k2=-K}^K I_{k1-k2} H_{k1} H_{k2}^*$$

Используя разработанную методику, были рассчитаны и проанализированы шумовые характеристики трёх типов смесителей: диодного, пассивного на полевом транзисторе и активно на биполярном транзисторе.

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДНОГО СМЕСИТЕЛЯ

Для расчёта коэффициента шума диодного смесителя необходимо выбрать нелинейную модель диода, учитывающую также и его шумовые свойства (рис. 1).

Нелинейными элементами здесь являются проводимость $g_{п}$ и ёмкость $C_{п}$ перехода (или барьера для диодов Шоттки). Источники шумов в диоде имеют как тепловую (шум последовательного сопротивления $R_{д}$), так и дробовую природу и моделируются в схеме источниками шумового тока:

$$\langle I_{R} I_{R}^* \rangle = \frac{4kT}{R_{д}}, \quad \langle I_{п} I_{п}^* \rangle = 2qI,$$

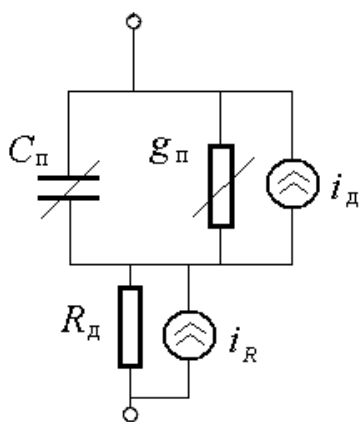


Рис.1. Нелинейная эквивалентная схема диода с шумовыми источниками тока

где I — ток, текущий через диод. Необходимо отметить, что эти источники не коррелированы между собой, причём источник теплового шума является линейным, а дробового — нелинейным. Шум сопротивления источника сигнала (Z_c) имеет тепловую природу, не коррелирован с другими источниками и его спектральная плотность определяется соотношением:

$$\langle I_c I_c^* \rangle = \frac{4kT}{Re(Z_c)}. \quad (5)$$

Используя разработанную методику анализа и выбранную модель диода, были рассчитаны зависимости коэффициента передачи и коэффициента шума балансного смесителя на диодах D353 фирмы Infinion от уровня подаваемого гетеродина (рис.2).

Из графиков видно, что при уровне гетеродина выше 10 дБм происходит насыщение коэффициента передачи смесителя, а уровень шумов начинает расти. Поэтому именно этот режим будет оптимален для работы устройства.

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАССИВНОГО СМЕСИТЕЛЯ НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

На рис.3 приведена нелинейная шумовая модель полевого транзистора, работающего при нулевом питании на стоке. Нелинейным элементом в ней является выходная проводимость транзистора $g_{си}$, а источниками теплового шума — паразитные сопротивления выводов R_3 , R_c , $R_{и}$ и та же выходная проводимость. Их спектральные плотности определяются соотношениями:

$$\langle I_3 I_3^* \rangle = \frac{4kT}{R_3}, \quad \langle I_{и} I_{и}^* \rangle = \frac{4kT}{R_{и}},$$

$$\langle I_c I_c^* \rangle = \frac{4kT}{R_c}, \quad \langle I_{си} I_{си}^* \rangle = 4kTg_{си}.$$

Все источники не коррелированы между собой, первые три являются линейными, а последний — нелинейным. Шумовой ток сопротивления источника сигнала определяется соотношением (5).

На основе этой модели и рассмотренной выше методики анализа были рассчитаны зависимости коэффициента передачи и коэффициента шума пассивного смесителя на полевом транзисторе AT8251 фирмы Avantek от уровня подаваемого гетеродина (рис. 4а) и напряжения смещения на затворе (рис. 4б).

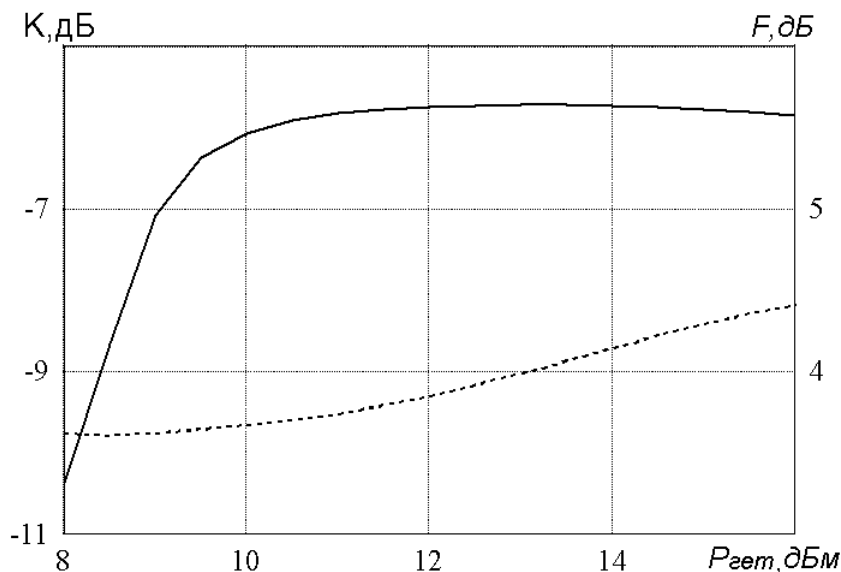


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления (сплошная кривая) и коэффициента шума (пунктирная кривая) балансного диодного смесителя от уровня гетеродина

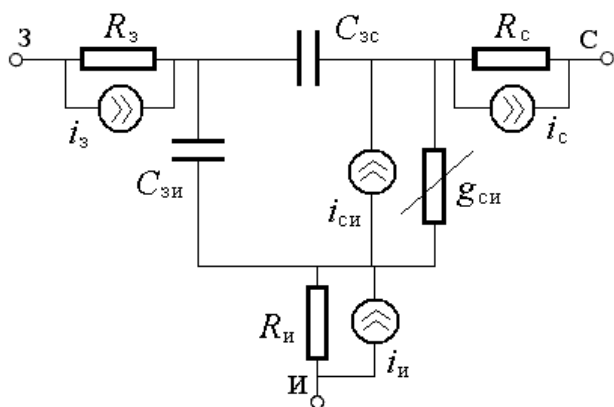


Рис. 3. Нелинейная эквивалентная схема полевого транзистора при нулевом питании на стоке с шумовыми источниками тока

Из графиков видно, что оптимальным режимом работы смесителя как по коэффициенту передачи, так и по коэффициенту шума будет режим при $U_{зи}$ от $-0,9$ до $-0,7$ В при уровне гетеродина порядка 5 дБм. Дальнейшее увеличение гетеродина лишь незначительно улучшает характеристики устройства, повышая при этом энергетические затраты.

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОГО СМЕСИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ С ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ

В отличие от рассмотренных выше смеситель на биполярном транзисторе является ак-

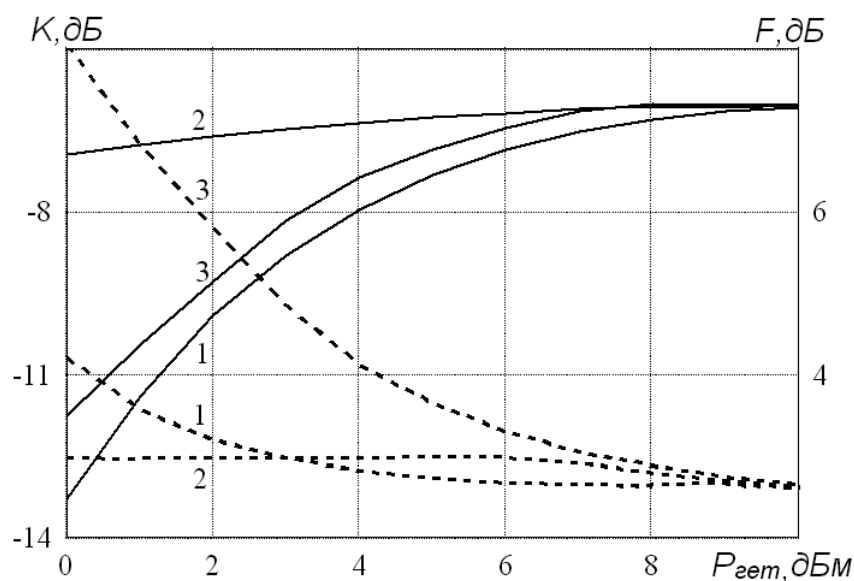
тивным, то есть помимо преобразования частоты осуществляет ещё и усиление полезного сигнала. На рис. 5 приведена нелинейная эквивалентная схема транзистора, учитывающая также и его шумовые свойства.

Нелинейными здесь являются входная проводимость $g_{бэ}$ и ёмкость $C_{бэ}$ транзистора, а также выходной источник тока, характеризуемый крутизной g . Источников собственного шума в транзисторе пять: тепловые шумы паразитных сопротивлений выводов $R_б$, $R_к$, $R_э$ и дробовые шумы тока базы и тока коллектора. Последние два источника в общем случае коррелированы между собой. Однако эта корреляция начинает сказываться на частотах выше 10 ГГц [5], поэтому в работе она не учитывается. Спектральные плотности шумовых источников определяются соотношениями:

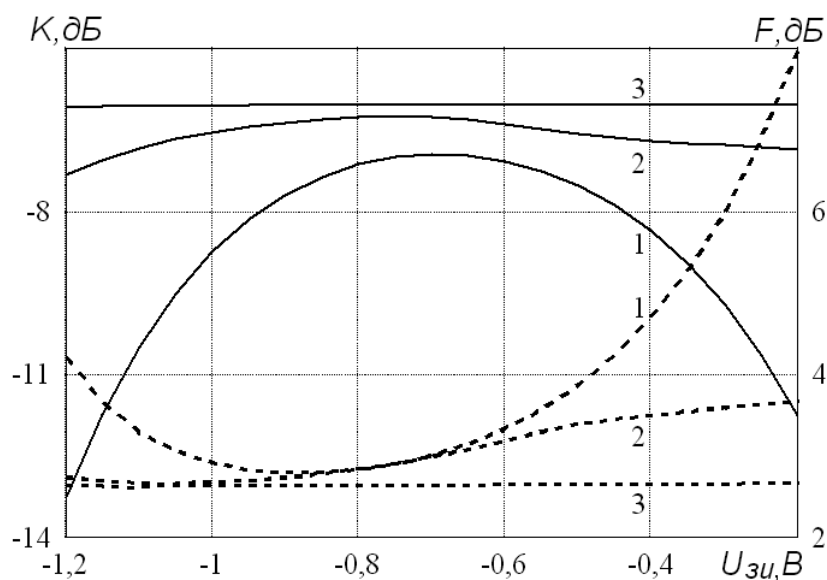
$$\begin{aligned} \langle I_б I_б^* \rangle &= \frac{4kT}{R_б}, & \langle I_э I_э^* \rangle &= \frac{4kT}{R_э}, & \langle I_к I_к^* \rangle &= \frac{4kT}{R_к}, \\ \langle I_{кэ} I_{кэ}^* \rangle &= 2qI_к, & \langle I_{бэ} I_{бэ}^* \rangle &= 2q \frac{I_к}{\beta}. \end{aligned}$$

Здесь $I_к$ — ток коллектора, β — коэффициент усиления по току транзистора. Источники тепловых шумов в модели являются линейными, а источники дробовых — нелинейными. Шумовой ток сопротивления источника сигнала определяется также соотношением (5).

Используя данную модель транзистора и разработанную методику анализа были расчи-



a



б

Рис. 4. Зависимости коэффициента усиления (сплошные кривые) и коэффициента шума (пунктирные кривые) пассивного смесителя на полевом транзисторе от уровня гетеродина (а) (кривые 1 соответствуют $U_{зи} = -1,2$ В, 2 — $U_{зи} = -0,7$ В, 3 — $U_{зи} = -0,2$ В) и напряжения смещения на затворе (б) (кривые 1 соответствуют $P_{гет} = 0$ дБм, 2 — $P_{гет} = 5$ дБм, 3 — $P_{гет} = 10$ дБм)

таны зависимости коэффициента передачи и коэффициента шума активного смесителя на биполярном транзисторе с гетеропереходом SiSiGe BFP620 фирмы Infineon от уровня подаваемого гетеродина (рис.6а) и тока коллектора, который определяется выбором напряжения смещения на базе (рис. 6б).

Из графиков видно, что коэффициент передачи и коэффициент шума достигают своих оптимальных значений при уровне гетеродина порядка 15 дБм. Что касается режима работы по постоянному току, то с увеличением тока коллектора увеличивается как коэффициент передачи, так и коэффициент шума. Поэтому

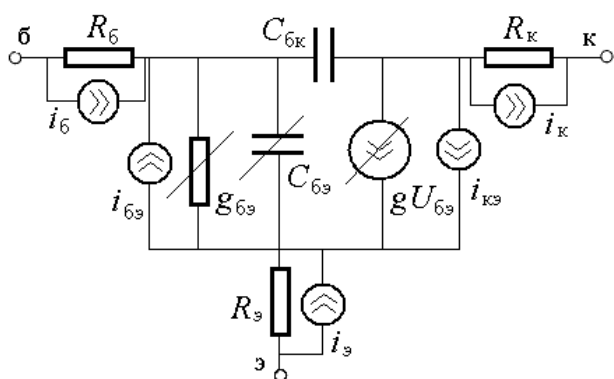


Рис. 5. Нелинейная эквивалентная схема биполярного транзистора с гетеропереходом с шумовыми источниками тока

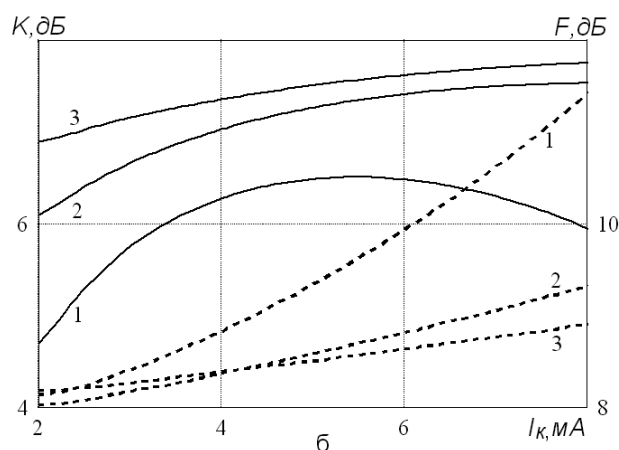
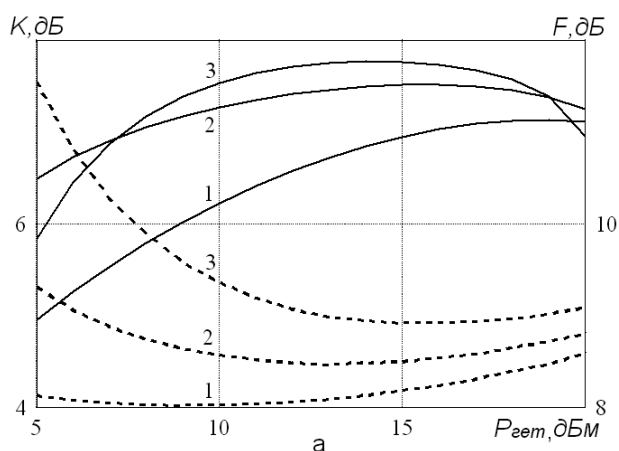


Рис. 6. Зависимости коэффициента усиления (сплошные кривые) и коэффициента шума (пунктирные кривые) активного смесителя на биполярном транзисторе от уровня гетеродина (а) (кривые 1 соответствуют $I_{\kappa} = 2$ мА, 2 — $I_{\kappa} = 5$ мА, 3 — $I_{\kappa} = 8$ мА) и тока коллектора (б) (кривые 1 соответствуют $P_{\text{гет}} = 5$ дБм, 2 — $P_{\text{гет}} = 10$ дБм, 3 — $P_{\text{гет}} = 15$ дБм)

здесь необходимо выбирать компромиссное решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в работе представлена разработанная методика расчёта коэффициента шума смесителя на основе его нелинейной шумовой модели и метода конверсионных матриц. Рассмотрены три типа смесителей и источники собственных шумов в них. Рассчитаны и исследованы передаточные и шумовые характеристики данных смесителей в зависимости от режима работы и уровня подаваемого гетеродина. Установлено, что для диодного смесителя с увеличением уровня гетеродина наступает насыщение коэффициента передачи, а коэффициент шума начинает возрастать. Для пассивного смесителя на полевом транзисторе существует оптимальный режим работы с точки зрения передаточных и шумовых свойств. И, наконец, для активного смесителя на биполярном транзисторе с гетеропереходом необходимо выбирать компромиссное решения для режима работы и уровня гетеродина, так как улучшение одних характеристик ведёт к нежелательному изменению других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах / М.Букингем, пер. с англ. под ред. В. Н. Губанкова — М.: Мир, 1986. — 398.
2. Аверина Л.И. Уменьшение интермодуляционных искажений во входном радиоприёмном тракте / Л. И. Аверина [и др.] // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. — 2010. — № 12. — С. 40—45.
3. Maas S.A. Microwave Mixers / S. A. Maas. — Norwood, MA: Artech House, 1993. — 375.
4. Held D.N. Conversion Loss and Noise of Microwave and Millimeter-Wave Mixers / D. N. Held., A. R. Kerr // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-26, 1978. — P. 49—52.
5. Бобрешов А.М. Изменение собственного шума усилителя на биполярном транзисторе с гетеропереходом в нелинейном режиме/ А. М. Бобрешов [и др.]// Известия ВУЗов. Электроника. — 2007. — № 4. — С. 15—20.

Шумовые характеристики свч смесителей

*Аверина Лариса Ивановна — к.ф.-м.н.,
доцент кафедры электроники Воронежского
госуниверситета.*

Тел.: (473) 243—09—76

E-mail: averina@phys.vsu.ru

*Averina Larisa Ivanovna — Candidate of
physical and mathematical sciences, Associate
Professor, Department of Electronics, Voronezh
State University.*

Tel.: (473) 243—09—76

E-mail: averina@phys.vsu.ru

*Бобрешов Анатолий Михайлович —
д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой электрони-
ки Воронежского госуниверситета.*

Тел.: (473) 255-19-19

E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

*Bobreshov Anatoly Mikhailovich — Doctor of
physical and mathematical sciences, Professor,
Head of Electronics Department, Voronezh State
University.*

Tel.: (473) 255-19-19

E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

*Шапошникова Жанетта Вячеславовна —
заместитель начальника отдела ОАО «Кон-
церн «Созвездие».*

Тел.: (473) 248-06-59

E-mail: zhanetta_sh@mail.ru

*Shaposhnikova Janetta Vyacheslavovna —
Deputy chief of Department, Joint Stock Com-
pany “Concern “Sozvezdie”.*

Тел.: (473) 248-06-59

E-mail: zhanetta_sh@mail.ru