

Оптимизация режима работы детектора с низкобарьерным диодом Шоттки для радиометрических измерений в диапазоне частот от 10 МГц до 1.5 ГГц

Обсуждаются результаты теоретического и экспериментального анализа по оптимизации режима работы детектора СВЧ мощности с низкобарьерным диодом Шоттки с нулевым смещением для достижения максимального диапазона квадратичного детектирования СВЧ сигналов в широкой полосе частот и высоким коэффициентом перекрытия рабочего диапазона.

Ключевые слова: детектор СВЧ мощности, низкобарьерный диод Шоттки, динамический диапазон

Полупроводниковые СВЧ детекторы мощности находят широкое применение в измерительных устройствах, системах автоматического управления и других радиотехнических устройствах различного назначения. В последние годы они активно используются в бытовой радиоэлектронной аппаратуре, в медицине, биологии и других областях науки и техники. Традиционно СВЧ детекторы мощности применяются в радиоастрономии [1, 2], например, в приемных комплексах радиоинтерферометрической сети «КВАЗАР-КВО» (ИПА РАН) в режиме радиометрических измерений.

Наибольшее распространение в практике конструирования радиоэлектронной аппаратуры получили диодные СВЧ детекторы мощности. Их положительные свойства – большой диапазон входного сигнала и рабочих частот, высокое быстродействие и чувствительность, стабильность преобразования, во многом способствуют их широкому использованию в приёмных радиотехнических устройствах. Однако все возрастающие требования к рабочим характеристикам приёмных устройств делают необходимым проведения дальнейшего анализа и оптимизации параметров широкополосных детекторов СВЧ мощности.

В работе представлены результаты оптимизации режима работы детектора СВЧ мощности на базе низкобарьерного диода Шоттки с нулевым смещением для достижения максимального диапазона квадратичного детектирования СВЧ сигналов в широкой полосе частот с высоким коэффициентом перекрытия рабочего диапазона.

РАСЧЕТ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА

На рис. 1. изображена эквивалентная схема разработанного широкополосного однополупериодного детектора СВЧ мощности на базе диода HSMS-2855 (производство фирмы Avago Technologies) с нулевым смещением, работающего в диапазоне частот от ~ 10 МГц до ~ 1.5 ГГц и с граничной частотой выходного фильтра низкой частоты (НЧ) $f_{НЧ}$ около 10 кГц [2]. Здесь $C_{П}$ – емкость перехода, R_S – последовательное сопротивление растекания, R_G и R_C – соответственно сопротивление генератора и сопротивление согласования СВЧ тракта (обычно $R_G = R_C = 50$ Ом), R_H и C_H – сопротивление нагрузки и емкость фильтра НЧ детектора. Буквой D на схеме обозначен идеальный переход, ток через который I_D как функция напряжения, приложенного к барьеру U_D определяется формулой Шокли:

$$I_D = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right], \quad U_T = \frac{kT \cdot n}{e} \quad (1)$$

где I_S – ток насыщения, U_T – температурный потенциал, e – заряд электрона, T – температура перехода, k – постоянная Больцмана, n – коэффициент неидеальности диода.

Система уравнений Кирхгофа для эквивалентной схемы, показанной на рис.1., содержит два разных масштаба времени $T_1 = 2\pi/\omega$ и $\ll T_2 = 1/f_{нч}$, причем $T_1 \ll T_2$.

$$U_G = E_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$I_D = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right] + C_j \cdot \frac{dU_D}{dt} \quad (3)$$

$$I_D = \frac{U}{R_H} + C_H \cdot \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

В дальнейшем, учитывая рабочий диапазон частот детектора до 1.5ГГц, влияние емкости перехода $C_{п} = 0.18$ пФ не учитывается.

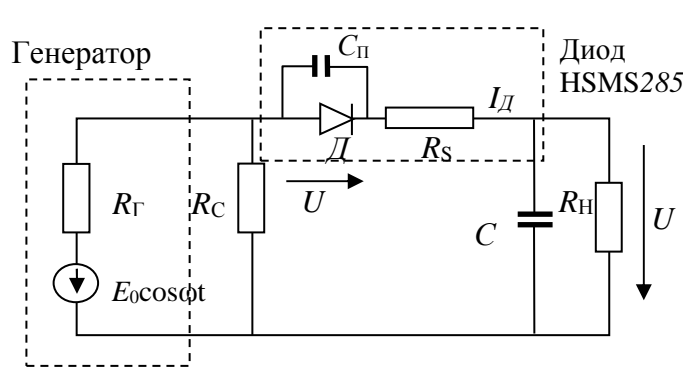


Рисунок 1

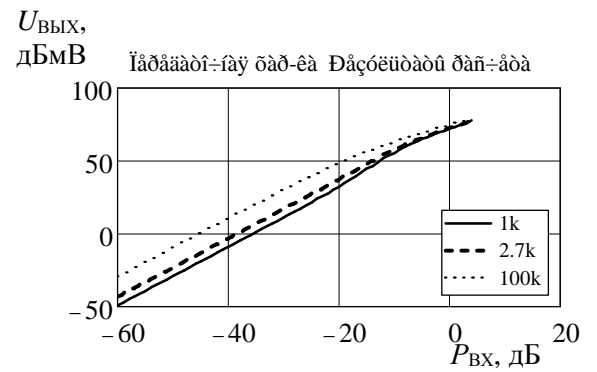


Рисунок 2

После усреднения по «быстрому» времени T_1 получим следующее нелинейное дифференциальное уравнение для определения выходного напряжения U

$$\left[\frac{dU}{dt} + \frac{U}{C_H R_H} + \frac{I_S}{C_H} \right] \cdot \exp \left[\frac{U \cdot \left(1 + \frac{R_S}{R_H} + \frac{R_{ГC}}{R_H} \right) + C_H (R_S + R_{ГC}) \frac{dU}{dt}}{U_T} \right] = \frac{I_S}{C_H} \cdot I_0 \left[\frac{E_0}{U_T} \right] \quad (5)$$

Здесь E_0 – амплитуда СВЧ-колебаний; $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка первого рода, $R_{ГC}$ – сопротивление параллельного соединения R_G и R_C .

Уравнение 5 представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка, описывающее зависимость напряжения на выходе детектора от мощности входного СВЧ сигнала при заданных параметрах (режиме работы) детектора. Решение этого уравнения проводилось проекционным методом Галеркина-Ритца [3,4]. В качестве

трех первых базисных (координатных) функций выбирались функции U_0 , $\sin 2\pi f$ и $\cos 2\pi f$.

Полученные аналитические соотношения позволили рассчитать передаточную (детекторную) характеристику – зависимость напряжения на выходе детектора $U_{\text{вых}}$ от мощности входного СВЧ сигнала $P_{\text{вх}}$ и ее отклонение от линейной зависимости – ошибку квадратичного детектирования ε . Передаточная характеристика для различных сопротивлений нагрузки детектора $R_{\text{н}}$ представлена на рис. 2.

РАСЧЕТ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И УРОВНЯ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ

Рассмотрим основные шумовые источники в схеме диодного детектора и рассчитаем их общий уровень $U_{\text{шум_нч}}$ приведенный к выходу фильтра НЧ, что позволит определить тангенциальную чувствительность детектора $P_{\text{тн}}$. В качестве усилителя выходного низкочастотного сигнала детектора в предлагаемой схеме использовался высокостабильный малошумящий инструментальный операционный усилитель (ОУ) AD8221 (фирма-изготовитель Analog Devices) с общим коэффициентом усиления $K_{\text{у}} \approx 100$.

В рассматриваемой схеме действует три фундаментальных источников шума: источник шумового тока диода, источник шумового напряжения ОУ, источник шумового тока ОУ и тепловой «Джонсоновский» шум резисторов цепи. Шум диода, как и ОУ, имеет две компоненты: «белый» шум на средних частотах и $1/f$ шум («фликер» или НЧ шум) на низких частотах, спектральная плотность мощности которого обратно пропорциональна частоте. Частота, на которой спектральная плотность НЧ шума равна спектральной плотности белого шума определяется как частота среза шума $f_{\text{с}}$ и является мерой качества: чем ниже частота среза $f_{\text{с}}$, тем лучше устройство. Для прецизионных (инструментальных) ОУ величина частоты среза составляет единицы и доли герца, в частности для AD8221 $f_{\text{су}} = 6$ Гц. Для диода HSMS-2855 частота среза $f_{\text{сд}} = 200$ Гц. На частотах выше $f_{\text{с}}$ спектральная плотность мощности шумового напряжения и тока операционного усилителя постоянна и равна соответственно $e_{\text{ш}} = 8$ нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и $I_{\text{н}} = 40$ фА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ [5].

Тангенциальная чувствительностью детектора $P_{\text{тн}}$ рассчитывалась по следующей формуле [2]:

$$P_{\text{тн}} = \frac{U_{\text{шум_нч}}}{S}, \quad (6)$$

где S - чувствительность детектора по напряжению, определяемая по передаточной характеристике. График зависимости уровня выходных шумов детектора $U_{\text{ш}}$ от $R_{\text{н}}$, рассчитанный нами с учетом вклада всех источников шума приведён на рис. 3. Расчеты, проведенные по формуле (6) показывают, что чувствительность детектора $P_{\text{тн}}$ монотонно увеличивается при увеличении нагрузки, стремясь к конечному пределу.

РАСЧЕТ ДИАПАЗОНА КВАДРАТИЧНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Проведенные расчеты передаточной характеристики позволяют определить протяженность участка квадратичного детектирования по заданной точке компрессии. Точкой компрессии называется входная мощность СВЧ сигнала на входе детектора при

заданном отклонении передаточной функции от линейного закона в координатах входная мощность – выходное напряжение. Обычно такое отклонение задается в децибелах, например, P_1 – точка компрессии по уровню отклонения в 1 дБ. Расчеты показывают, что зависимость P_1 от сопротивления нагрузки имеет резкий максимум около $R_H = 2$ кОм (см. рис.4.).

Определим динамический диапазон квадратичного детектирования D как разность точки компрессии P_1 и тангенциальной чувствительности детектора P_{tn} , выраженных в дБ.

$$D = P_1 - P_{tn}, \text{ дБ} \quad (7)$$

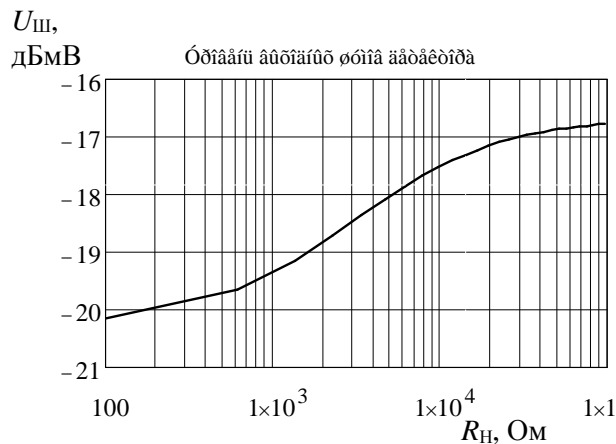


Рисунок 3

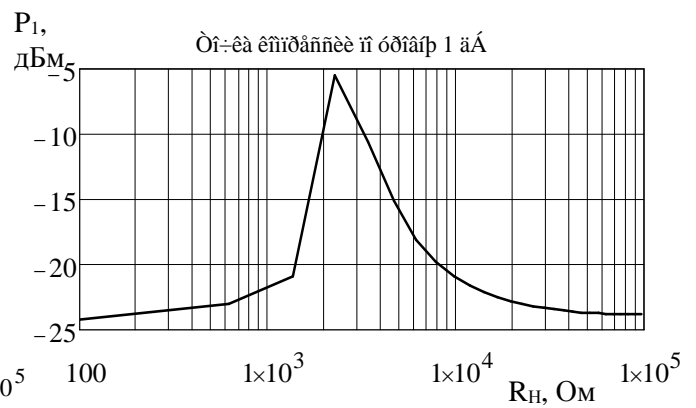


Рисунок 4

Анализ полученных результатов показывает, что для детектора СВЧ мощности, выполненного на базе диода HSMS-2855 с нулевым смещением, существует оптимальная величина сопротивления нагрузки равная 2 кОм, при которой динамический диапазон квадратичного детектирования достигает максимальной величины более 40 дБ. При этом уровень точки компрессии P_1 также максимален и составляет около минус 5 дБм.

При выборе диода в качестве нелинейного элемента детектора СВЧ мощности для реализации максимального динамического диапазона необходимо решить двухпараметрическую задачу поиска экстремума D , как функции двух переменных тока насыщения I_S и нагрузки R_H диода. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующий вывод: для достижения максимального динамического диапазона детектирования СВЧ мощности необходимо выбирать диоды с уровнем тока насыщения около 1 – 3 мкА. При этом достигается динамический диапазон детектора более 40 дБ и уровень точки компрессии P_1 около минус 2 дБм при оптимальном сопротивлении нагрузки около 2 кОм.

Проведенные расчеты показали также зависимость максимально достижимого динамического диапазона от критерия точки компрессии. Величина оптимального сопротивления возрастает при переходе от критерия компрессии в 1дБ – P_1 к критерию в 0,25дБ – $P_{0.25}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА

В работе производилось измерение передаточной характеристики и динамического диапазона однополупериодного детектора СВЧ мощности, выполненного на базе

низкобарьерного диода Шоттки HSMS-2855 с нулевым смещением. Передаточные характеристики детекторов измерялись по немодулированному гармоническому ВЧ сигналу. Регистрация выходного низкочастотного сигнала детектора производилась с помощью аппаратно-программной платформы компании National Instruments на базе CompactRIO с контроллером NI cRIO-9022, шасси NI cRIO-9111 и модулем регистрации NI cRIO-9205. Взаимодействие платформы CompactRIO с компьютером осуществлялась с использованием низкоуровневого сетевого протокола TCP/IP. Программное обеспечение, выполненное в среде графического языка LabVIEW помимо задач сбора данных, позволяет выполнять построение передаточной характеристики детектора с учетом калибровок по проведенным измерениям уровня собственных шумов измерительной установки.

На рис. 5 и 6 представлены результаты измерений передаточной характеристики детектора при сопротивлении нагрузки 100к и ошибки квадратичного детектирования ϵ . На рис. 5. штриховой линией изображена расчетная зависимость передаточной характеристики по изложенной выше методике. Также приведен уровень выходного шума детектора, определяющий тангенциальную чувствительность P_{th} .

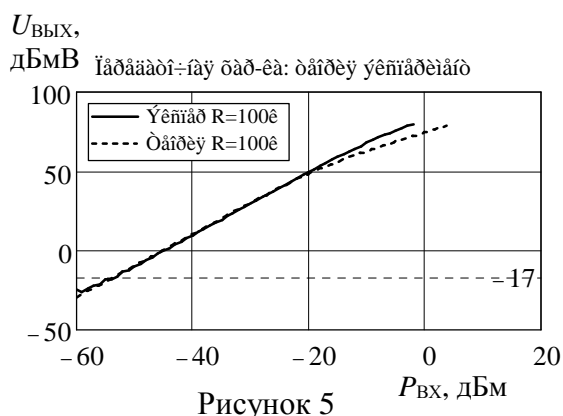


Рисунок 5

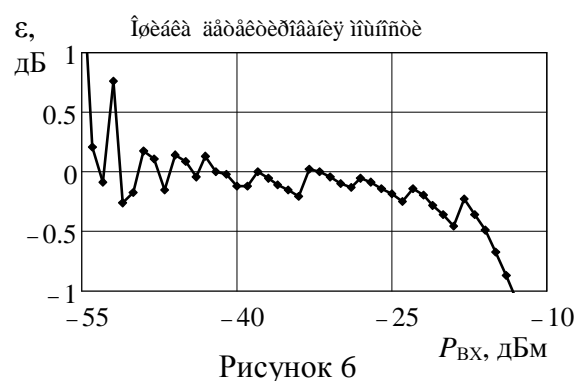


Рисунок 6

Таким образом, проведенный теоретический и экспериментальный анализ показывает возможность оптимизации режима работы детектора СВЧ мощности на базе низкобарьерного диода Шоттки по критерию достижения максимального динамического диапазона.

Библиографический список

1. Ипатов А.В. Ипатов В.А. Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. № 7. С. 769-777.
2. Иванов С.И., Лавров А.П., Матвеев Ю.А. Разработка и исследование диодных детекторов для радиометрических измерений в радиоастрономии // Труды ИПА РАН. Вып. 25.- СПб: Наука, 2012.- С.102-107.
3. Robert G.Harrison. Nonsquarelaw Behavior of Diode Detectors Analyzed by the Ritz-Galerkin Method // IEEE Tr. Microwave Theory and Techniques.– 1984, v.42, № 5.– P.840 – 8461.
4. Михлин С.Г. Численная реализация вариационных методов.– М.: Наука, 1966.
5. OP AMP Applications/Walter G. Jung Editor. – Analog Devices. – 2002.
6. Зотов М.Б., Иванов С.И. и др. Динамический диапазон широкополосного детектора СВЧ мощности на низкобарьерном диоде Шоттки с нулевым смещением // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч.IX – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С.7-