

**Сазоненко Н.Ю., Сединин А.Д., Никитин Ю.А.,
Юрова В.А.**

Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича

Исследование базовых схем смесителей на полупроводниковых структурах

Смесители или перемножители сигналов широко используются в устройствах микроэлектроники и СВЧ электроники. В работе проведено компьютерное моделирование элементарных ячеек перемножителей сигналов на полевых и биполярных транзисторах в среде MICRO CAP версии 9 и 11. Получены спектральные характеристики выходных колебаний и проведена их сравнительная оценка. Анализ полученных результатов показал, что наилучшими спектральными характеристиками преобразования сигнала обладают схемы с использованием униполярных структур. Отмечено, что схема смесителя на основе токового зеркала обладает лучшей линейностью преобразования, чем схема, выполненная на транзисторном каскаде по схеме включения с ОЭ и с питанием от генератора тока, даже при больших величинах входного сигнала.

Ключевые слова: перемножитель, смеситель, спектр, транзистор, транзисторный каскад, полупроводниковые структуры, *p-n*-переход

Во многих современных устройствах микроэлектроники и электроники СВЧ используются схемы перемножителей сигналов (смесителей) [1-2], при конструировании которых следует обеспечить жесткие требования по линейности преобразования. Это связано с тем, что в результате взаимодействия совокупности входных сигналов разной частоты на нелинейных элементах смесителя появляются интермодуляционные искажения, часть из которых может попасть в полосу пропускания фильтра приемника, вследствие чего не сможет быть удалена с помощью линейной фильтрации [3-4]. Устраняют эту проблему обеспечением линейности применяемых перемножителей сигналов и выбором уровней и частот сигнала и гетеродина, что приводит к понижению уровня паразитных продуктов преобразования, то есть комбинационных составляющих порядка выше второго, до приемлемых значений.

Перемножение сигналов происходит с помощью нелинейных преобразований на *p-n*-переходе – диода или биполярного транзистора, или на нелинейности входной, почти квадратичной, характеристике полевого транзистора. В случае идеального перемножения колебаний $A(t)$ и $B(t)$ спектр выходного колебания $C(t)$ состоит из двух боковых составляющих, одна из которых является полезной:

$$C(t) = A(t) \times B(t) = \frac{AB}{2} \times [\cos 2\pi(f_{\text{гет}} - f_c)t + \cos 2\pi(f_{\text{гет}} + f_c)t]. \quad (1)$$

p-n-переход – это основа биполярных полупроводниковых усилительных и преобразовательных элементов. Вольтамперная характеристика данного перехода описывается формулой [1, 5]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{U_D}{\varphi_T}\right) - 1 \right],$$

где I_0 – тепловой обратный ток p - n -перехода; U_D – напряжение на переходе, $U_D = U_{\pm} + U_c \sin(\omega_c + \varphi_c) + U_r \sin(\omega_r + \varphi_r)$; U_{\pm} – постоянное напряжение, приложенное к переходу; входной сигнал есть линейная двухтоновая композиция вида $U_c \sin \omega_c t + U_r \sin \omega_r t$, $U_c < U_r$; $\varphi_T = \frac{kT}{q}$, причём $k = 1.38 \times 10^{-21}$ Дж/°С – постоянная Больцмана; T – температура в градусах Кельвина; $q = 1.6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона. При комнатной температуре $\varphi_T = 25.6$ мВ – термический потенциал, равный контактной разности потенциалов на границе p - n -перехода при отсутствии внешнего напряжения.

На выходе смесителя появляются новые колебания, которых не было в исходном сигнале. Как правило, полезным является одно из колебаний вида (1): разностное $U_{\text{разн}} = U_{\text{СМ}} \sin(\alpha - \beta)$ или суммарное $U_{\text{СУММ}} = U_{\text{СМ}} \sin(\alpha + \beta)$ (у повышающего смесителя).

Усилительные структуры на основе транзисторов различаются не только схемотехническими решениями. Основное различие заключается в режиме их работы. Преобразовательные элементы базовых транзисторных структур работают в пассивном режиме, в то время как их усилительные элементы – в активном режиме.

Рассмотрим три разновидности базовых биполярных структур: схему общим эмиттером (ОЭ) с параллельно включенным диодом (токовое зеркало) – а), схему ОЭ с последовательно включенным диодом – б) и схему с ОЭ – в), – рис.1.

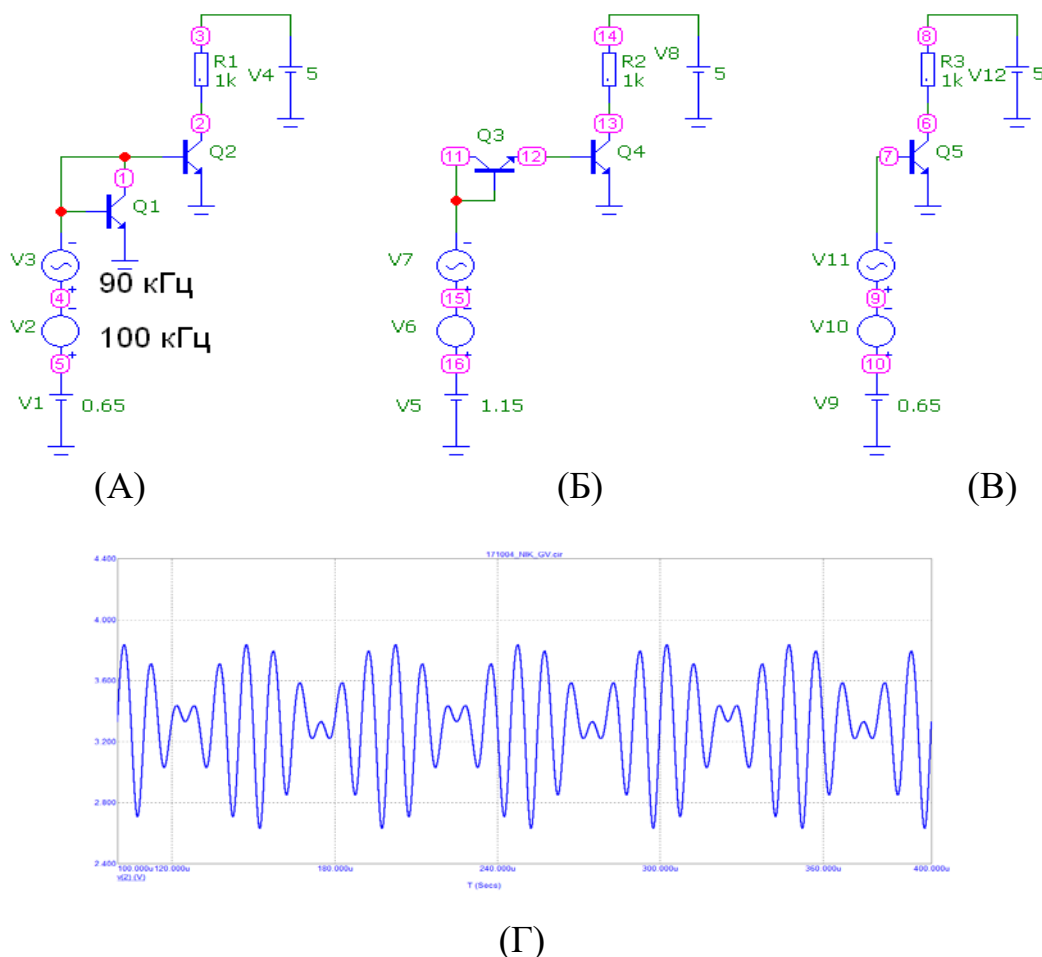


Рис. 1. Транзисторные каскады (А) – (В), работающие от генераторов напряжения и эпюра выходного сигнала напряжения (Г)

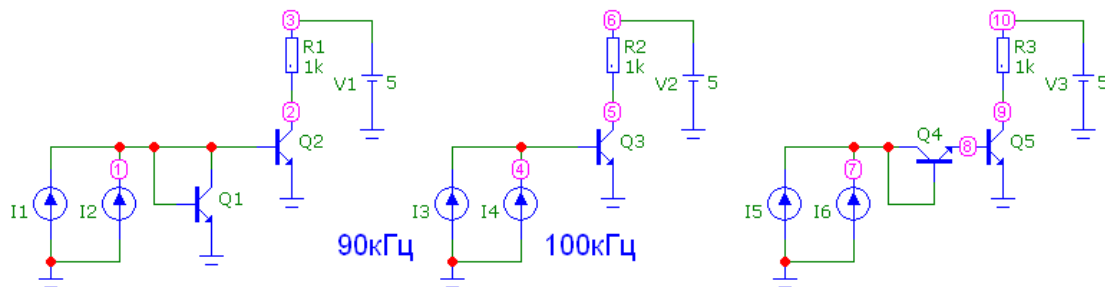
На рис.1 источником сигнала является генератор напряжения для всех рассматриваемых схем. Постоянное смещение подобрано таким образом, чтобы токи коллекторов выходных транзисторов были примерно одинаковыми.

Нелинейность буферных усилительных каскадов оценивается по критерию IM_2 [6-7] при подаче на вход схемы сигнала и гетеродина одинаковых по уровню и близких по частоте сигналов (90кГц и 100кГц). Для широкополосных усилителей нелинейность определяется как отношение максимальной по уровню комбинационной составляющей к амплитуде входного парциального сигнала U_c .

Компьютерное моделирование проводилось в среде MICRO CAP 9 и 11. Анализ компьютерного моделирования спектрального состава выходного сигнала на выходе всех трех структур (рис. 1) показывает, что при одинаковом уровне выходного сигнала и при работе от генераторов напряжения преимуществом по линейности не обладает ни одна из рассмотренных элементарных биполярных структур.

На рис. 2, Г колебания на вход буферного усилителя на основе токового зеркала – а), схемы с ОЭ – б), схемы ОЭ с последовательно включенным диодом – в) подаются от генераторов тока. Постоянное смещение подобрано таким образом, чтобы токи коллекторов окончных транзисторов были примерно одинаковыми.

Анализ компьютерного моделирования показывает, что при работе от генераторов тока линейность усилительных каскадов на биполярных $p-n$ -переходах выше, чем при работе этих структур от генераторов напряжения. Наилучшей линейностью обладает элементарная базовая структура на основе каскада с общим эмиттером с параллельно включенными транзисторами.



Работа усилительных каскадов от генераторов тока

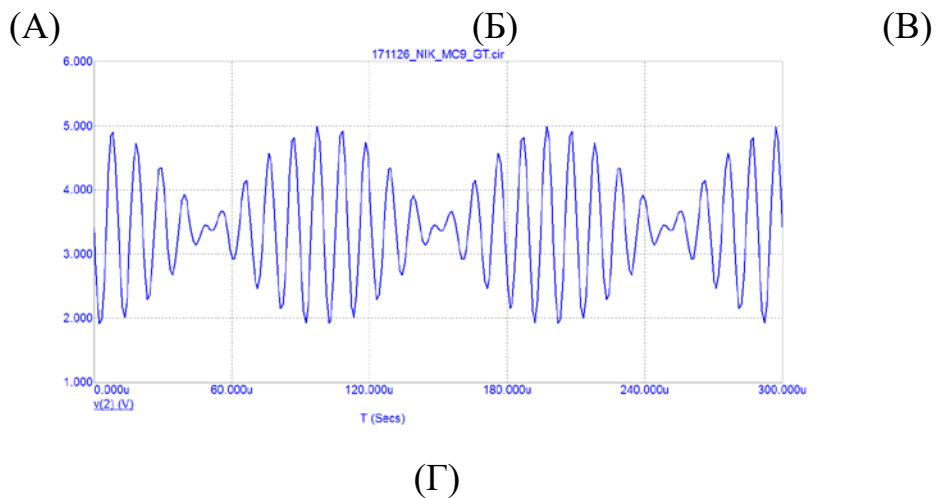


Рис. 2. Транзисторные каскады (А) – (В), работающие от генераторов тока и эпюры выходного сигнала напряжения (Г)

Теперь рассмотрим схему на основе полевого транзистора по схеме с общим истоком. Полевой транзистор с изолированным затвором имеет квадратичную характеристику, более приемлемую для преобразования частоты сигнала и гетеродина. Это означает, что в идеальном смесителе на базе униполярного транзистора комбинационные составляющие ограничены третьим порядком: $(2 \cdot f_{\text{Гет}} \pm f_c)$ и $(2 \cdot f_c \pm f_{\text{Гет}})$.

Ток стока I_c в рабочей точке полевого транзистора приближенно можно определить по следующей формуле:

$$I_c = I_{c0}(1 - U_{з.и}/U_{отс})^2$$

где $U_{отс}$ – напряжение отсечки; I_{c0} – ток насыщения при $U_{з.и} = 0$.

Формула для спектра сигнала на выходе преобразовательной ячейки с квадратичной передаточной характеристикой примет следующий вид:

$$Y_{\text{Вых}} = 1 - 2A \sin \alpha - 2A \sin \beta + \frac{A^2}{2}(1 + \cos 2\alpha) + \frac{B^2}{2}(1 + \cos 2\beta) + AB[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)].$$

На рис. 3, а представлена схема базовой ячейки смесителя на полевом транзисторе.

На рис. 3, б представлен результат компьютерного моделирования спектрального состава выходного композитного колебания на выходе смесительной ячейки на полевом транзисторе (рис. 3, а).

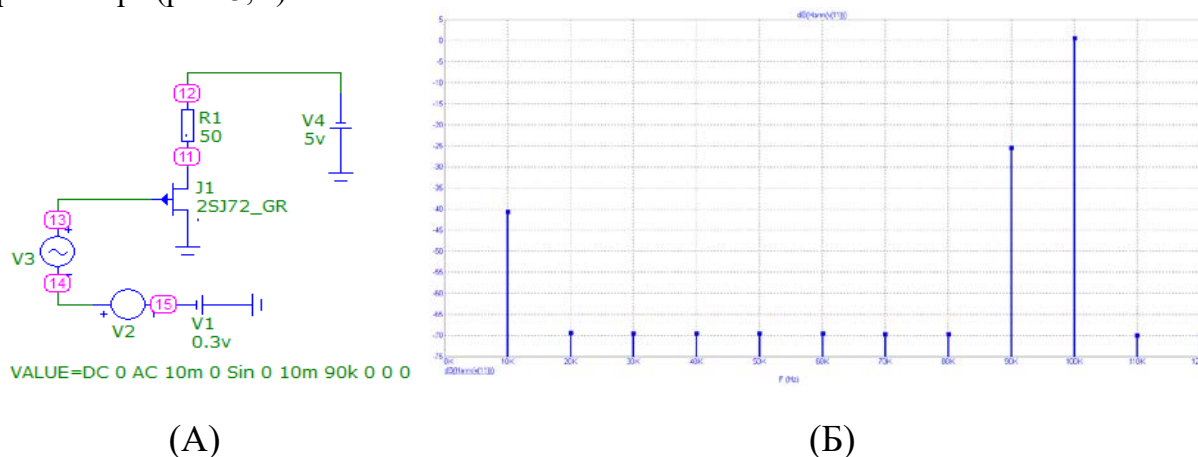


Рис.3. Базовая ячейка смесителя на полевом транзисторе (А) и спектр сигнала на её выходе (Б)

Таким образом, в данной работе были получены спектральные характеристики выходного сигнала для схем смесителей, выполненных на основе каскада на токовом зеркале и диодной схемы и базовой ячейки на полевом транзисторе.

Из анализа спектров выходного сигнала видно, что наилучшими спектральными характеристиками преобразования обладают схемы с использованием полевого транзистора вследствие приближенности входной характеристики к квадратичной по сравнению со схемой на полупроводниковых биполярных структурах.

Библиографический список

1. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. 6-е издание / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин // СПб.: Лань Burger R.M., Donovan R.P. 2002 – 480 с.

2. Федорцов А.Б., Юрова В.А. Проектирование схемы светоприемного устройства для исследования характеристик веществ // Неделя науки СПбГПУ: материалы научного форума с международным участием. СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2017. С. 88 – 90.
3. Никитин Ю.А. Схемотехника современных микроволновых синтезаторов частот. Часть 1. Общие положения. Пассивный синтезатор частот: учебное пособие. СПб. – СПбГУТ, 2015. 100 с.
4. Бобрешов А. М., Малезин М. И., Степкин В. А., Усков Г. К. Двойной балансный смеситель для перемножения сверхширокополосных импульсных сигналов // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2014. № 2. С. 5–13.
5. Никитин Ю.А. Схемотехника современных микроволновых синтезаторов частот: Часть 3. Элементы микроволновых синтезаторов. Аналоговая схемотехника: учебное пособие. СПб. – СПбГУТ, 2016. 91 с.
6. Поляков А.Е., Стрыгин Л.В. Методика измерения IP2 и IP3 двухтонового сигнала // Труды МФТИ. 2012. № 2. С. 54 – 63.
7. Сазоненко Н.Ю., Сединин А.Д., Никитин Ю.А., Юрова В.А. Исследование особенностей работы схем смесителей (перемножителей) частоты. Сборник: Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. 2017. С. 48-50.