

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ ТРЕТЬЕГО
ПОРЯДКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СВЧ-ШИРОКОПОЛОСНЫХ
УСИЛИТЕЛЕЙ С РАБОЧИМ ДИАПАЗОНОМ
ЧАСТОТ ДО 6 ГГц**

Е.М. Савченко, зам. зав. каф., доцент каф. РТУ МИРЭА, к.т.н.;
А.Д. Першин, нач. отд. ООО «МАС»;
А.А. Любшов, аспирант НИЯУ МИФИ
г. Москва, designcenter@icvao.ru

Приводятся результаты исследований интермодуляционных искажений третьего порядка, СВЧ-широкополосных усилителей (ШПУ), серийно выпускаемых в АО «НПП «Пульсар».

Ключевые слова: интермодуляционные искажения третьего порядка, ОИРЗ, СВЧ-широкополосные усилители (ШПУ).

В современных системах связи одним из ключевых параметров, влияющих на качество сигнала и способность приемника принимать полученный модулированный сигнал, является интермодуляционная избирательность. Одним из распространенных блоков любого приемного устройства является СВЧ ШПУ, позволяющий усилить мощность сигнала до необходимого уровня. Важным при этом является внесение в сигнал наименьших искажений.

Интермодуляционные искажения в широкополосных усилителях – это дополнительные составляющие в спектре выходного сигнала, возникающие в нелинейных элементах усилителей (транзисторах), при взаимодействии нескольких сигналов с разными частотами. Наихудшими являются продукты интермодуляционных искажений третьего порядка (ОИРЗ), так как располагаются ближе всего к несущим частотам ($2f_2 - f_1$ и $2f_1 - f_2$), и их тяжелее всего отфильтровать. Большой уровень ОИРЗ ШПУ, используемых в приемниках систем связи, могут существенно ухудшать их интермодуляционную избирательность.

Одним из широко востребованных и распространенных отечественных СВЧ ШПУ являются интегральные микросхемы серии 1324 [1]. Схемы представляют собой усилитель на основе составного транзистора Дарлингтона с параллельной отрицательной обратной связью (ООС) по напряжению. Использование ООС позволяет обеспечить широкую полосу пропускания при небольшой площади кристалла ИМС. Верхняя граничная частота полосы пропускания в СВЧ-диапазоне определяется частотными свойствами элементного базиса использованного технологического процесса [2, 3].

Были проведены исследования ОИРЗ СВЧ ШПУ серии 1324, выполненных на основе Si и GaAs технологических процессах с диапазоном рабочих частот до 3 и до 6 ГГц соответственно. В таблице приведены основные характеристики исследуемых ШПУ. На рис. 1 представлены результаты измерения ОИРЗ и $P_{\text{вых}}$ 1 дБ.

Основные параметры исследуемых СВЧ ШПУ

Параметр	1324УВЗУ	1324УВ6У1	1324УВ2У	1324УВ15У	1324УВ8У	1324УВ9У
Тех. процесс	Si бип. тр. (0,6 мкм; $f_t = 15$ ГГц)			GaAs ГБТ (2,0 мкм; $f_t = 31$ ГГц)		
Δf , ГГц	до 3,5	до 3	до 3,1	до 6	до 6	до 6
K_y , дБ	19,0	19,2	20,0	19,3	20,0	22,0
$P_{\text{вых}}$, мВт	10	50	100	8	50	100
$U_n @ I_n$	3,3 В @ 30 мА	5 В @ 50 мА	5 В @ 90 мА	3,3 В @ 30 мА	5 В @ 50 мА	5 В @ 100 мА

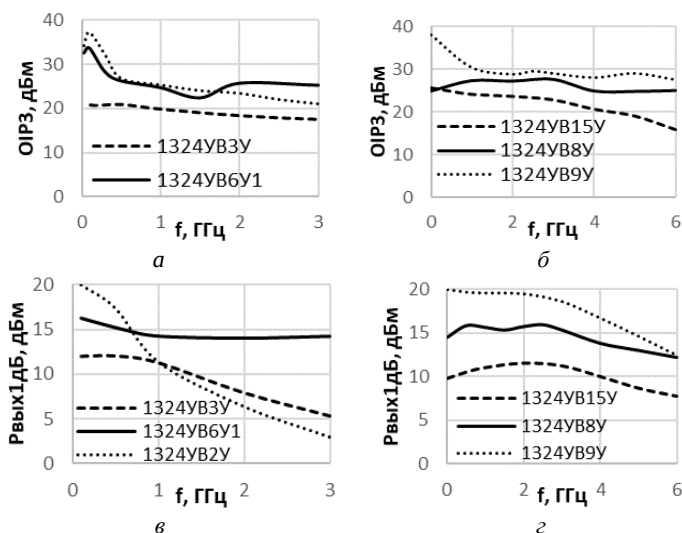


Рис. 1. Частотная зависимость ОИРЗ и $P_{\text{вых}}$ 1 дБ для усилителей с верхней частотой до 3 ГГц на основе Si (а, в) и до 6 ГГц на GaAs (б, г)

Измерения ОИРЗ проводились с использованием автоматизированного стенда, включающего в свой состав два СВЧ-генератора (Keysight, N5183B и E4438C), резистивный сумматор мощности (Mini-Circuits, ZN2PD2-14W-S+), анализатор спектра (Микран, СК4М-18) и ПО (Python, MS Excel) для управления и обработки результатов. Для каждой точки частотного диапазона строилась зависимость продуктов интермодуляции 3-го порядка (IM3) и $P_{\text{вых}}$ от уровня входной мощно-

сти и определялась точка пересечения их экстраполированных характеристик.

Основные выводы по результатам исследования:

1. Для маломощных СВЧ ШПУ 1324УВ3 и 1324УВ15У с выходной мощностью 10–12 мВт наблюдается лучшее значение ОИРЗ (на 4–5 дБ до 3 ГГц) для ШПУ на основе GaAs (1324УВ15У).

2. Для СВЧ ШПУ средней мощности 1324УВ6У1 и 1324УВ8У с выходной мощностью 30–50 мВт на нижних частотах кремниевый образец усилителя имеет большее значение ОИРЗ (на 4–6 дБ до 400 МГц). На частотах свыше 400 МГц значения ОИРЗ сопоставимы у обеих схем и составляют 24–28 дБм.

3. Для СВЧ ШПУ 1324УВ2У и 1324УВ9У с выходной мощностью 80–100 мВт на нижних частотах (до 400 МГц) наблюдается высокое значение ОИРЗ (30–37 дБм) для обоих образцов усилителей, однако с ростом частоты у кремниевого образца усилителя наблюдается существенный спад ОИРЗ и на верхней границе диапазона (3 ГГц) значение ОИРЗ падает до 20 дБм. Для ШПУ 1324УВ9У на основе GaAs значение ОИРЗ во всём рабочем диапазоне частот (до 6 ГГц) более равномерно и составляет не менее 28 дБ.

4. Для всех вариантов ШПУ наблюдается прямая зависимость уровня ОИРЗ от уровня выходной мощности, однако в некоторых поддиапазонах частот есть расхождения. В частности, для ШПУ 1324УВ6У1 частотная зависимость ОИРЗ не монотонна и на частотах 1–1,8 ГГц есть спад (на 4 дБ) в отличие от $P_{\text{вых}}$ 1 дБ. Для ШПУ 1324УВ9У в диапазоне 2–6 ГГц $P_{\text{вых}}$ 1 дБ падает на 6 дБ, в то время как ОИРЗ практически не изменяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савченко Е.М., Будяков А.С., Першин А.Д., Дроздов Д.Г., Кузьмин А.Ю. Новые разработки отечественных СВЧ МИС широкополосных усилителей // Твердотельная электроника. СФ блоки РЭА: матер. XIV науч.-техн. конф. – М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2015. – С. 183–187.

2. Савченко Е.М., Першин А.Д., Будяков А.С., Фондеркин К.И. Результаты разработки СВЧ МИС усилителей малой и средней мощности // Твердотельная электроника. СФ блоки РЭА: матер. XII науч.-техн. конф. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. – С. 78–81.

3. Савченко Е.М., Першин А.Д., Будяков А.С., Щепанов А.Н. Результаты разработки модулей СВЧ-усилителей мощности с диапазоном рабочих частот от 0,2 до 3,4 ГГц и выходной мощностью 5 Вт в непрерывном режиме // Твердотельная электроника. СФ-блоки РЭА: матер. XV Всерос. науч.-техн. конф. 2017. – С. 27–33.