

Исследование линейности СВЧ МИС усилителя мощности на гетероструктурах нитрида галлия

И.Л. Хеглунд, А.Х. Курбанов, А.А. Белов, Б.В. Калинин

ООО «Микровейв АйСи»

Аннотация: В данной статье представлено исследование линейности СВЧ МИС усилителя мощности при помощи измерения интермодуляционных искажений третьего порядка. Особенностью данного исследования является поиск оптимального соотношения параметров линейности и мощностных характеристик усилителя при помощи изменения напряжений питания усилителя.

Ключевые слова: линейность, интермодуляционные искажения, усилитель мощности

1. Введение

В работе современных передающих модулей одной из важных характеристик сигнала является его линейность. Одним из основных параметров линейности является уровень интермодуляционных искажений (IMD), которые зависят от нелинейных свойств элементов электронных схем.

В работе приведены результаты исследования 25 Вт СВЧ МИС усилителя мощности МС107, предназначенного для использования в системах радиолокации, и определен оптимальный режим работы усилителя в диапазоне питающих напряжений в целях получения более линейного выходного сигнала.

2. Интермодуляционные искажения

Линейность является важным параметром для повышения эффективности приемо-передающих трактов. Чем больше линейность СВЧ-тракта, тем меньшему количеству искажений будет подвержен полезный сигнал, проходящий через него до процесса демодуляции. Одним из основных способов оценки нелинейности усилителя является величина интермодуляционных искажений ΔIMD . Для определения уровня интермодуляционных искажений на усилитель подается двухтоновый сигнал с небольшой отстройкой по частоте. Вследствие нелинейных свойств СВЧ тракта происходит возбуждение интермод вблизи несущих частот, что показано на рисунке 1. Двухтоновый сигнал описывается при помощи формулы 1. Данные искажения являются продуктом взаимодействия гармонических сигналов, а именно составляющими третьего порядка, описанных в формуле 2.

$$s(t) = B_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + B_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (1)$$

$$s^3(t) = B_1^3 \cos^3(2\pi f_1 t + \varphi_1) + B_2^3 \cos^3(2\pi f_2 t + \varphi_2) + 3B_1^2 B_2 \cos^2(2\pi f_1 t + \varphi_1) \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) + 3B_1 B_2^2 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \cos^2(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (2)$$

Первые два члена описывают гармоники третьего порядка для каждого из входных тонов, тогда как третий и четвертый член представляют интермодуляционные составляющие третьего порядка. При помощи теоремы сложения (для тригонометрических функций) можно найти частоты, на которых появляются данные искажения:

$$\begin{aligned} f_{\text{TOI1}} &= 2f_1 - f_2 \\ f_{\text{TOI2}} &= 2f_2 - f_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Для оценки влияния интермодуляционных искажений используется такие параметры как $IP3$ и ΔIMD . $IP3$ – это теоретическая точка, в которой интермодуляционные составляющие на выходе исследуемого устройства равны исходным тонам на выходе измеряемого устройства. ΔIMD – это разница между амплитудой основного сигнала и ближайшей интермоды. Чем выше $IP3$ и больше по модулю уровень ΔIMD тем более линейным является выходной сигнал усилителя.

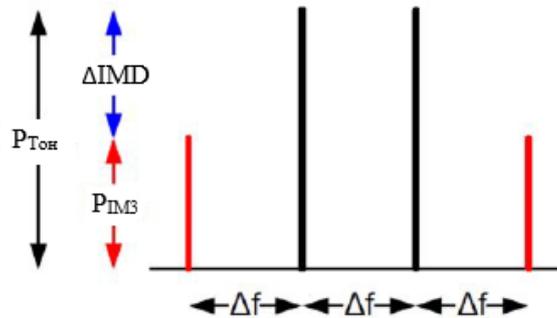


Рисунок 1. Двухтоновый сигнал с интермодуляционными составляющими

3. Проведение и результаты измерений

Для измерения интермодуляционных искажений был собран измерительный стенд, представленный на рисунке 2. Измерения проводились в непрерывном режиме на трех частотных точках: 4,4 ГГц, 4,75 ГГц и 5,1 ГГц с отстройкой на 1 МГц. Для обеспечения сигнала с высокой линейностью на входе измеряемого устройства были использованы два предусилителя 10 Вт, обеспечивающие достаточное усиление входного сигнала до уровня 26..29 дБм и достаточный уровень линейности. С целью получения равных значений входной мощности каждого тона перед началом измерений была произведена калибровка выходной мощности предусилителей в диапазоне частот и входных сигналов. Также было проведено измерение параметров линейности выходных сигналов предусилителей и получено значение параметра $\Delta IMD = -65$ дБн, что свидетельствует о том, что сигнал, подаваемый на вход исследуемого усилителя, является достаточно линейным и не повлияет на результат исследований.

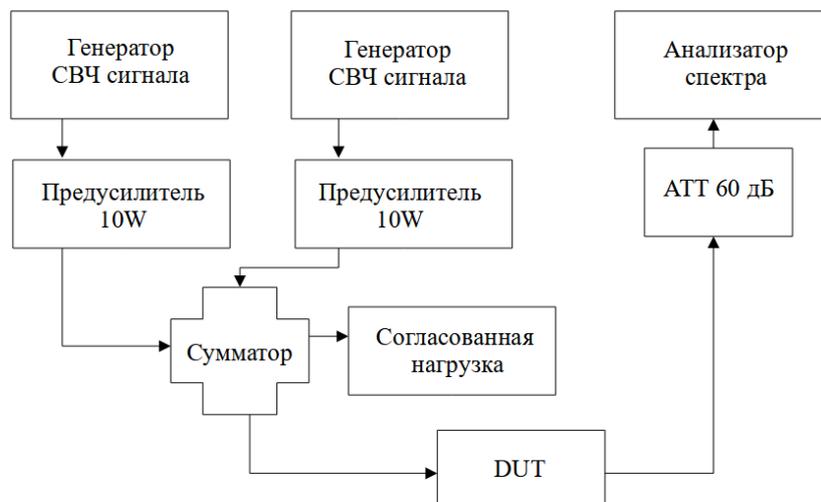
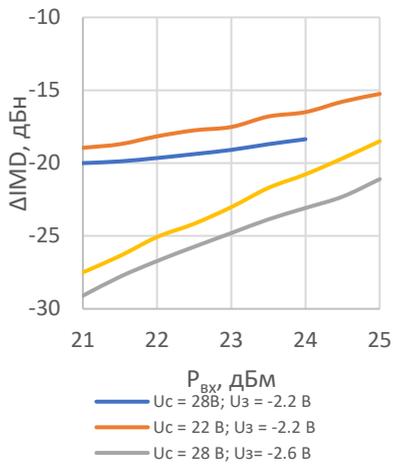


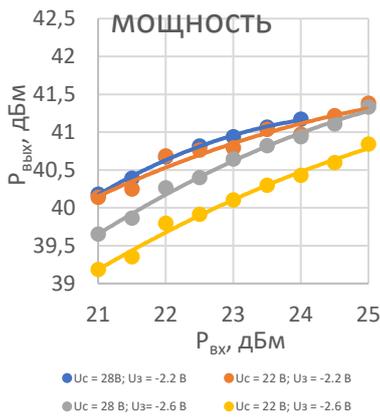
Рисунок 2. Стенд для измерения интермодуляционных искажений

4.4 ГГц

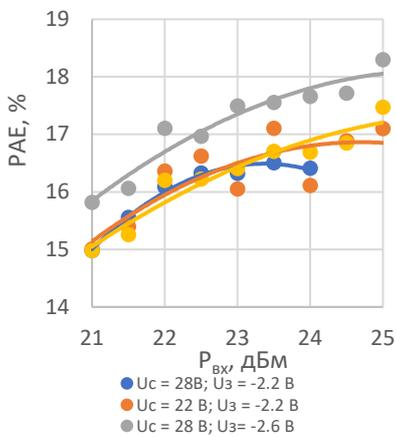
ΔIMD



Выходная мощность

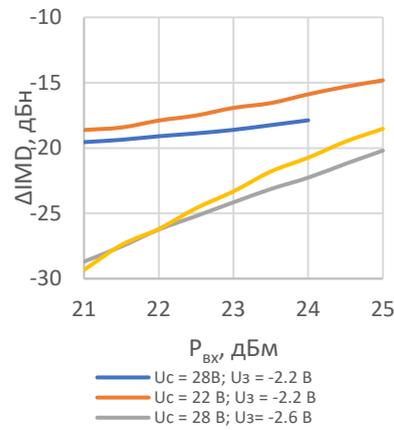


PAE

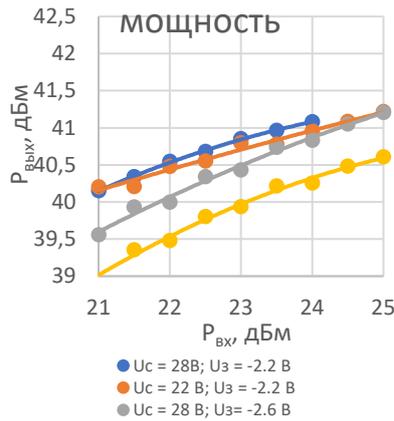


4.75 ГГц

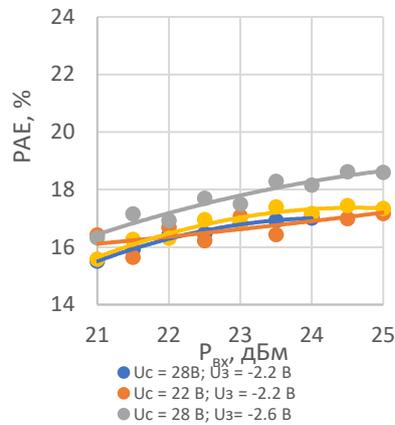
ΔIMD



Выходная мощность

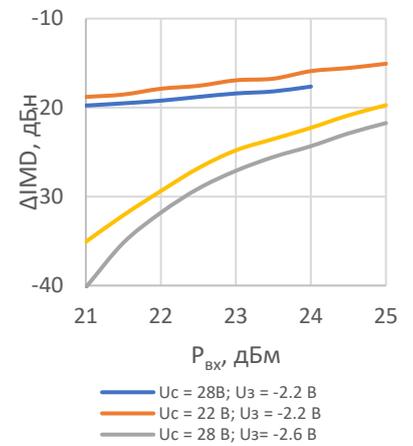


PAE

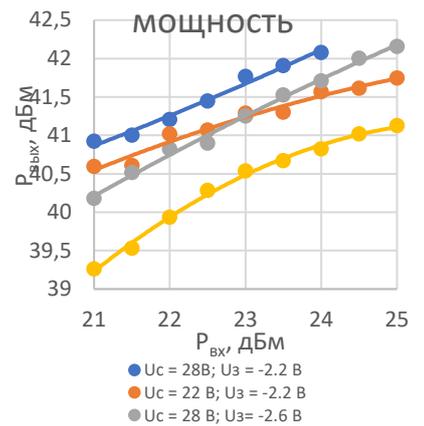


5.1 ГГц

ΔIMD



Выходная мощность



PAE

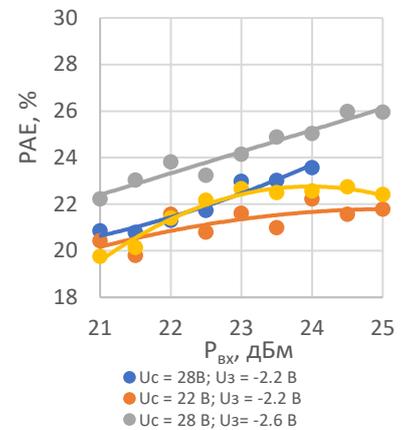


Рисунок 3. Итоговые зависимости ΔIMD , $P_{\text{вых}}$ и PAE, измеренные на трех частотах : 4.4 ГГц, 4.75 ГГц и 5.1 ГГц

Измеряемое устройство представляет собой СВЧ МИС усилителя мощности МІС107. Далее на каждой частотной точке были произведены измерения параметров IP_3 , ΔIMD , P_1 и P_2 (мощности исходных тонов) и тока стока I_c при значениях входной мощности 21..25 дБм. Для определения оптимальных параметров работы усилителя также были проведены аналогичные измерения с различными номиналами напряжений питания затвора и стока транзисторов с следующими вариациями: $U_c = 28$ В, $U_3 = -2.2$ В; $U_c = 28$ В, $U_3 = -2.6$ В; $U_c = 22$ В, $U_3 = -2.2$ В; $U_c = 22$ В, $U_3 = -2.6$ В.

По результатам исследования можно сделать вывод, что, при меньших значениях затворного напряжения, увеличиваются параметры линейности. При этом увеличивается PAE за счет уменьшения потребляемого тока, но уменьшается коэффициент усиления. Также в ходе эксперимента было показано, что при уменьшении напряжения на стоке происходит ухудшение параметров линейности, выходной мощности и PAE.

4. Заключение

В работе приведены результаты исследования СВЧ МИС усилителя мощности МІС107, полученные при помощи измерения параметров ΔIMD в нескольких режимах работы усилителя мощности в диапазоне входных сигналов. По результатам исследования можно сделать вывод, что для всего диапазоне частот оптимальным является режим работы $U_c = 28$ В, $U_3 = -2.6$ В. Для данного режима на частоте 5.1 ГГц при заданном уровне $\Delta IMD = -25$ дБн были достигнуты параметры суммарной выходной мощности $P_{вых} = 41.5$ дБм, и PAE = 24.8 %.

Список литературы

1. Сечи Ф., Буджатти М. Мощные твердотельные СВЧ-усилители. М.: Техносфера, 2016.
2. Белов Л.А., Кондрашов А.С., Петушков С.В. Корреляционная оценка уровня интермодуляционных искажений СВЧ-сигналов в усилителях мощности // Электросвязь. 2015. № 5. С. 36–41.
3. Ramian F. Измерение интермодуляционных искажений на современных анализаторах спектра // Rohde&Schwarz. – 2012. – 1EF79.
4. Белов Л.А. Интермодуляционные явления при усилении и обработке СВЧ-сигналов // СВЧ Электроника. № 1'2016. С. 78–84.