

# Оптимизация смещения на затворе с целью увеличения линейности усилителя мощности на гетероструктурах нитрида галлия

<sup>1</sup>И.Л. Хеглунд,<sup>1</sup> А.Х. Курбанов,<sup>1</sup> А.А. Белов,<sup>1</sup> Б.В. Калинин

<sup>1</sup>ООО «Микровейв АйСи»

**Аннотация:** В данной статье представлено исследование линейности СВЧ МИС усилителя мощности при помощи измерения интермодуляционных искажений третьего порядка. В данном исследовании проведено сравнение линейности при различных значениях частотной отстройки.

**Ключевые слова:** линейность, интермодуляционные искажения, крутизна транзисторов, усилитель мощности

## 1. Введение

В работе современных системах радиосвязи особую роль занимает обеспечение линейности сигнала. Нелинейные свойства усилителей мощности, входящих в состав передатчика, приводят к деградации сигнала, создавая проблемы при демодуляции сигнала в приемнике, также оказывая влияние на соседние каналы приёма. Одним из основных показателей линейности усилителя мощности является уровень интермодуляционных искажений третьего порядка (IMD3)

В статье приведены результаты исследования 25 Вт СВЧ МИС усилителя мощности МИС107, с точки зрения его использования в системах связи и определен оптимальный режим работы усилителя в целях получения наиболее линейного выходного сигнала в диапазоне частот, подходящих для систем связи стандарта 5G (FR1).

## 2. Линейность сигнала в усилителях СВЧ мощности

Современные технологии передачи данных предъявляют высокие требования к инфраструктуре, в том числе к СВЧ усилителям мощности (УМ). Одним из таких требований является компактность, вследствие чего для сокращения размеров передающих устройств всё чаще используются УМ на монолитных интегральных схемах. При этом к ним предъявляются и требования по обеспечению высоких уровней линейности. Это связано с переходом на более скоростные стандарты передачи информации и как следствие более сложные методы модуляции радиосигнала. В настоящее время всё больше внедряется система стандартов беспроводной связи 5G. Требования этой системы стандартов к уровням интермодуляций ставят новый вызов для разработчиков аналоговой части передающих устройств.

Одним из основных параметров, обеспечивающим должную работу передающих модулей в системах связи, является линейность сигнала. В активных приборах СВЧ-диапазона всегда присутствуют нелинейные искажения, связанные с особенностями работы таких приборов. Для обеспечения высоких уровней линейности и одновременно с этим достаточного уровня удельной выходной мощности и К.П.Д., выходные УМ работают в квазилинейном режиме. Это приводит к увеличению искажений и создает помехи в соседних частотных полосах [1], т.е. ухудшается помехоустойчивость. Линейность критична для систем, передающих сигналы с амплитудной модуляцией (АМ) или комбинацией АМ и фазовой модуляции, такой как квадратурная амплитудная модуляция (QAM) или квадратурное кодирование фазового сдвига (QPSK).

Согласно классической теории линейных систем [2] помимо сигналов на основных частотах, выходной сигнал содержит множество комбинационных составляющих, описанных в формуле 1:

$$\omega_{\text{инт}} = n\omega_1 \pm n\omega_2 \quad (1)$$

где  $m, n$  – неотрицательные числа, в том числе и ноль. Данные составляющие спектра называются интермодуляционными составляющими, а величина  $m+n$  называется порядком интермодуляционных искажений. Особую опасность представляют ИМИ нечетного порядка, 3-го, 5-го и т.д., имеющие частоту близкую к частотам  $f_1$  и  $f_2$  [3].

Для оценки влияния интермодуляционных искажений используются такие параметры как  $IP3$  и  $\Delta IMD$ .  $IP3$  – это теоретическая точка, в которой интермодуляционные составляющие на выходе исследуемого устройства равны исходным тонам на выходе измеряемого устройства.  $\Delta IMD$  – это разница между амплитудой основного сигнала и ближайшей интермоды. Чем выше  $IP3$  и больше по модулю уровень  $\Delta IMD$  тем более линейным является выходной сигнал усилителя [4, 6].

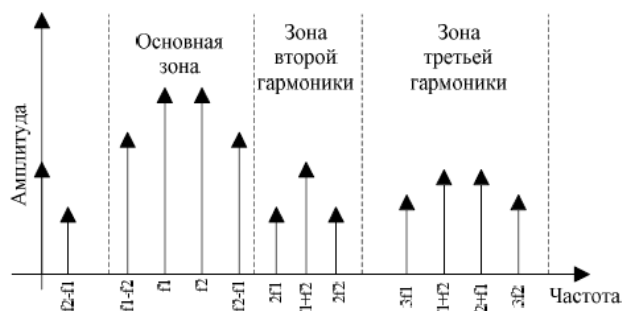


Рисунок 1. Спектр сигнала на выходе усилителя мощности при двухтональном воздействии

Ключевым элементом СВЧ УМ являются транзисторы, поэтому особенно важно рассмотреть их влияние на линейность всей системы. Основными параметрами транзистора, которые обладают нелинейными свойствами:  $\mu$ , где  $\mu$  – крутизна транзистора,  $\sigma$  – проводимость сток-исток [2]. Среди данных параметров наиболее сильный вклад в нелинейное поведение дает  $\mu$ . На рисунках 2 и 3 представлены условные вольт-амперные характеристики и зависимость от  $U_{зи}$  для типичного НЕМТ устройства [3]. Как видно из графиков зависимостей, характеристики не имеют области, где крутизна является постоянной, вследствие чего даже малый уровень воздействующего сигнала приводит к нелинейной работе транзисторов [3].

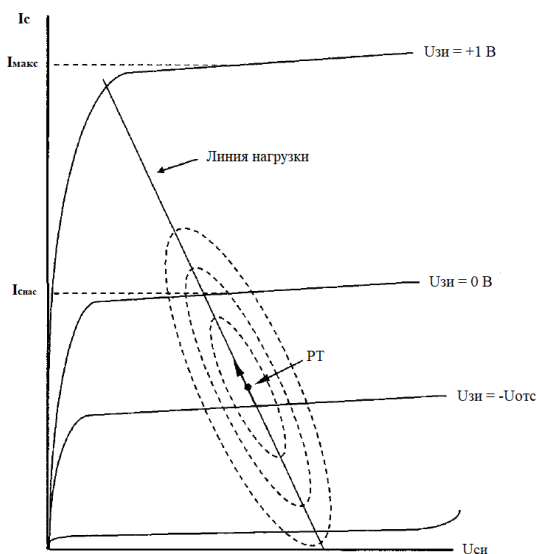


Рисунок 2. Условные ВАХ НЕМТ

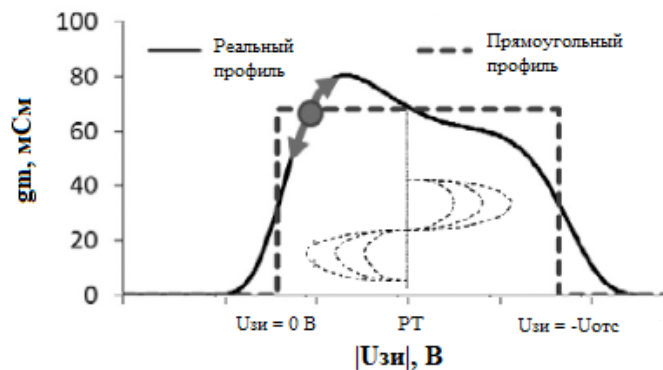


Рисунок 3. Стандартная для НЕМТ характеристика крутизны

### 3. Результаты расчета

Для определения режима работы, при котором усилитель работает в режиме оптимальной линейности, было произведено моделирование работы усилителя в САПР AWR. Для определения напряжения на затворе, обеспечивающее наименьшую величину ИМИ, были исследованы активные устройства УМ – транзисторы. В данной работе исследуется связь ИМИ третьего порядка и второй производной крутизны транзистора. Для определения более линейного участка характеристики от  $U_{зи}$  построены зависимости крутизны и ее производных от затворного напряжения. Как видно на рисунке 4, наименьшее значение ИМИ достигается при затворном напряжении -2.6 В (минимум на напряжении -2.4 В вызван точкой перегиба в зависимости крутизны от затворного напряжения, следовательно данный минимум не учитывается). В подтверждение правильности данного вывода было произведено моделирование работы усилителя с различными номиналами напряжений питания затвора:  $U_c = 28$  В,  $U_3 = -2.2$  В;  $U_c = 28$  В,  $U_3 = -2.6$  В. Результаты моделирования представлены на рисунке 5. Как можно увидеть из графиков, при напряжениях  $U_c = 28$  В,  $U_3 = -2.6$  В достигаются значения  $\Delta IMD = -25$  дБн и  $IP3 = 40$  дБм при выходной мощности на тон  $P1 = 40$  дБм. Данные расчета ранее были проверены на реальном усилителе в работе [4].

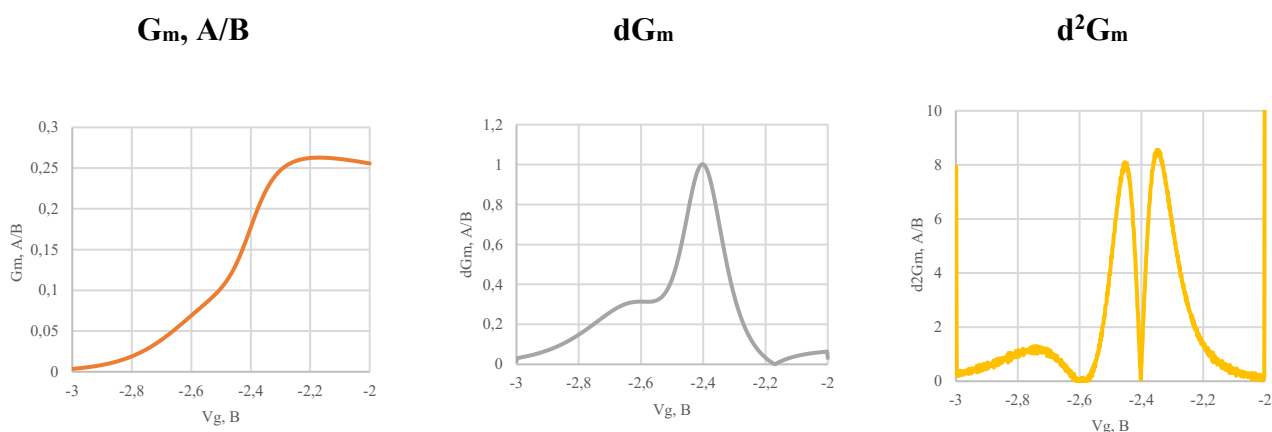


Рисунок 4. Результаты моделирования крутизны транзисторов, используемых в исследуемом УМ

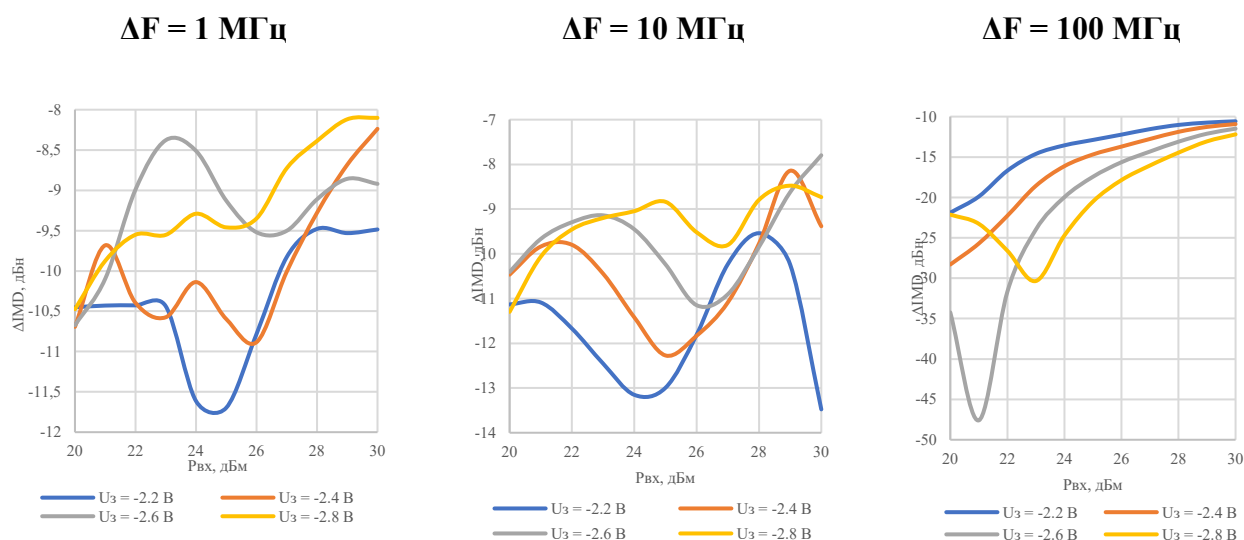


Рисунок 5. Результаты моделирования зависимостей  $\Delta IMD$  от входной мощности УМ MIC107

### 3. Проведение и результаты измерений

Описание стенда для измерения ИМИ, условий эксперимента, а также итоговые зависимости измерений параметров при разных напряжениях питания представлены в статье [4]. Далее представлены результаты исследования усилителя МС107 при установленных оптимальных напряжениях питания ( $U_c = 28 \text{ В}$ ,  $U_3 = -2.6 \text{ В}$ ) и трех различных отстройках по частоте сигналов (1 МГц, 10 МГц и 100 МГц). Данное исследование направлено на определение оптимальной отстройки сигналов для минимизации ИМИ.

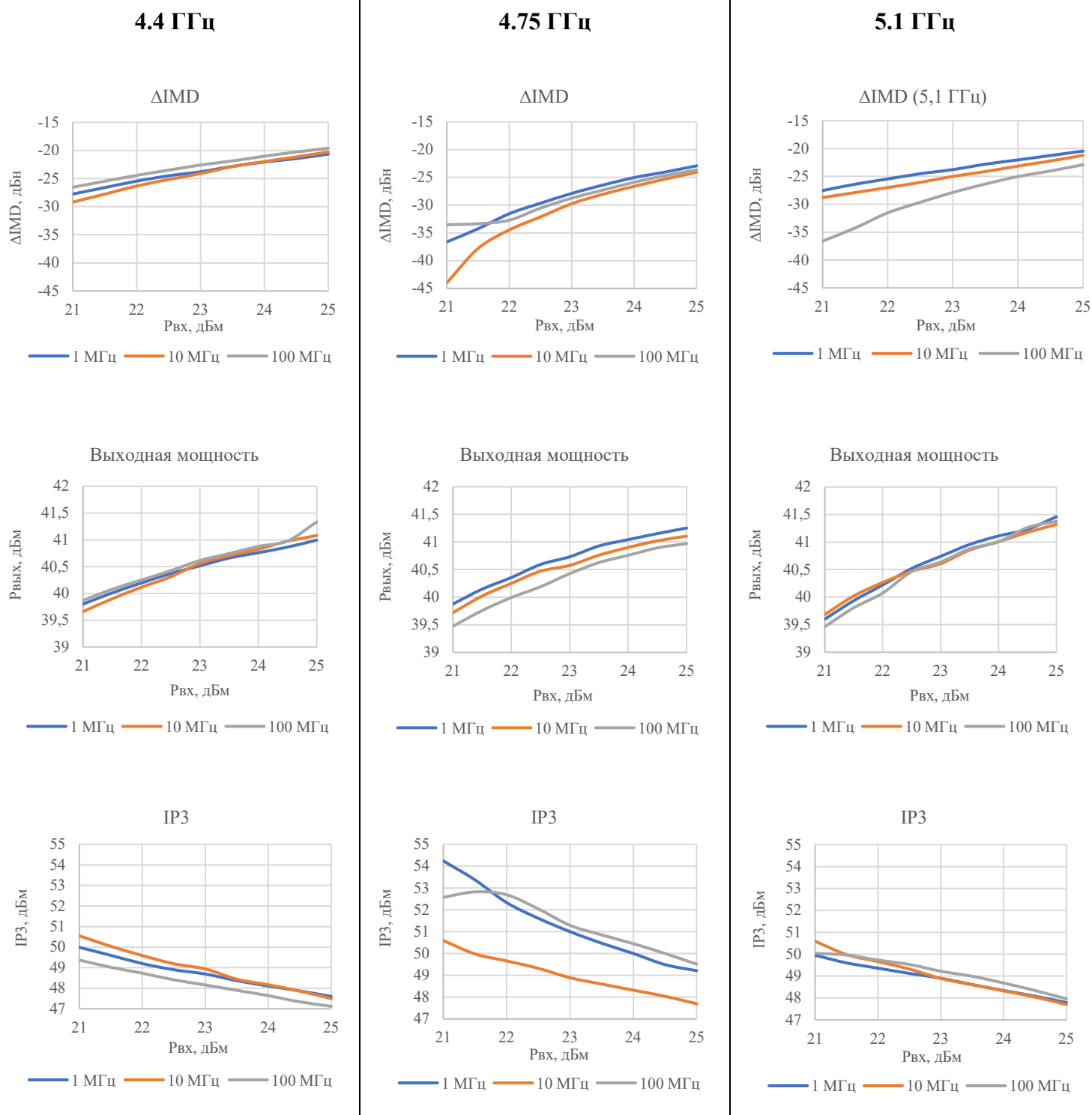


Рисунок 6. Итоговые зависимости  $\Delta\text{IMD}$ ,  $P_{\text{вых}}$  и  $\text{IP}_3$ , измеренные на трех частотах при разной отстройке по частоте

Анализируя зависимости можно сделать вывод, что на нелинейное поведение сильнее влияет его зависимость от частоты работы УМ. Хотя моделирование (рис. 5) показало прямую зависимость  $\Delta\text{IMD}$  от величины частотной отстройки, но на практике (рис. 6) видно, что при значительно большей отстройке сигнала по частоте (100 МГц) не получается существенно лучших результатов по сравнению с отстройкой в 10 МГц. При малых значениях отстройки ИМИ достаточно высок в обоих случаях.

#### 4. Заключение

В результате исследования было подтверждено предположение о том, что при помощи анализа зависимостей крутизны транзисторов УМ от затворного напряжения можно определить оптимальные значения напряжений питания УМ, которые в данном случае равны:  $U_c = 28$  В,  $U_z = -2.6$  В. Результат данного исследования также подтверждается в [4]. Также были смоделированы и измерены параметры линейности СВЧ усилителя мощности МС107 в зависимости от величины частотной отстройки сигналов на входе УМ. Было показано, что в определенном режиме работы данный УМ потенциально подходит для использования в системах 5G. Также можно сделать вывод, что для всего диапазоне частот оптимальной является отстройка по частоте более 10 МГц. Для данного режима на частоте 5.1 ГГц при заданном уровне  $\Delta\text{IMD} = -25$  дБн были достигнуты параметры суммарной выходной мощности  $P_{\text{вых}} = 41.5$  дБм, и  $\text{PAE} = 24.8$  %.

#### Список литературы

1. Сечи Ф., Бужатти М. Мощные твердотельные СВЧ-усилители. М.: Техносфера, 2016.
2. S.A. Maas, *Nonlinear Microwave Circuits*. Norwood, MA: Artech House, 1988.
3. M.J. Bailey, *Intermodulation distortion in pseudomorphic HEMT's and an extension of the classical theory*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 48, no. 1, Jan. 2000.
4. Хеглунд И.Л., Курбанов А.Х., Белов А.А., Калинин Б.В. Исследование линейности СВЧ МС усилителя мощности на гетероструктурах нитрида галлия, XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. С. 292-295.
5. 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.
6. Ramian F. Измерение интермодуляционных искажений на современных анализаторах спектра // Rohde&Schwarz. – 2012. – 1EF79.
7. Белов Л.А. Интермодуляционные явления при усилении и обработке СВЧ-сигналов // СВЧ Электроника. № 1'2016. С. 78–84.
8. N.V. Carvalho, J.C. Pedro, «Large- and Small-Signal IMD Behavior of Microwave Power Amplifiers», IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 47, no. 12, pp. 2364-2374, Dec. 1999.
9. Дмитриев В.Д., Коротаев В.М., Шишкин Д.А., «Оценка параметров рHEMT СВЧ полевого транзистора по нелинейным критериям», Доклады ТУСУРа, №2 (24), часть 3, с. 46-50, декабрь 2011.
10. Шутов В.Д., *Линеаризация СВЧ усилителей мощности методом цифровых предсказаний*, Воронеж, 2015.
11. Шур М., *Современные приборы на основе арсенида галлия: Пер. с англ.*—М.: Мир, 1991.—632 с., ил.
12. C. A. Liechti, "Microwave field-effect transistors—1976," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-24, pp. 279–300, June 1976.
13. G. Vendelin, *Design of Amplifiers and Oscillators by the S-Parameter Method*, New York: Wiley, 1982, pp. 10–14