

Интермодуляционные искажения в СВЧ усилителе класса F₃₅ на GaN транзисторе CGH6008D

Представлены результаты экспериментального исследования интермодуляционных искажений в сверхвысокочастотном усилителе мощности класса F₃₅ на нитрид-галиевом (GaN) транзисторе CGH6008D. Экспериментально получены интермодуляционные составляющие IMD₃ и IMD₅ на уровне -20,2 дБн при стоковом КПД 74,8%, КПД по добавленной мощности 71,5% и выходной мощности 37,1 дБм.

Ключевые слова: усилитель мощности класса F₃₅, интермодуляционные искажения, стоковый КПД, КПД по добавленной мощности

В настоящее время существует несколько классов высокоэффективных усилителей мощности (УМ), в которых теоретически возможно получить стоковый КПД (η_D) равный 100%. Одним из таких усилителей является УМ класса F [1]. Вместе с тем для получения $\eta_D = 100\%$ в УМ класса F необходимо использовать нагрузочную цепь, настроенную на бесконечное число гармоник тока стока, что на практике не представляется возможным. Поэтому обычно создают УМ класса F, нагрузочные цепи которых настроены на ограниченное число гармоник. К таким усилителям относят УМ класса F с добавлением третьей гармоники напряжения (класс F₃) и УМ класса F с добавлением третьей и пятой гармоник напряжения (класс F₃₅) [1]. Данные УМ также иногда называют УМ класса F с настройкой на три и на пять гармоник [2]. Согласно [3] для УМ класса F₃ $\eta_D = 90,69\%$, а для УМ класса F₃₅ $\eta_D = 94,77\%$. Для данных УМ хорошо изучены возможности манипулирования гармониками, считая, что транзистор и нагрузочные цепи усилителя предполагаются идеальными. Однако вследствие влияния большого числа факторов – свойств реального транзистора (его нелинейностей и паразитных элементов) и реальных свойств нагрузочных цепей усилителя многие вопросы, касающиеся работы данных УМ остаются невыясненными. Одним из таких вопросов является вопрос, влияния входной мощности (P_{in}) двухтонального сигнала, на значения уровня интермодуляционных искажений, в частности по составляющим типа $2f_1 - f_2$ ($2f_2 - f_1$) и $3f_1 - 2f_2$ ($3f_2 - 2f_1$). Где f_1 и f_2 – частоты сигналов, подаваемых на вход усилителя. Данные составляющие называют интермодуляционными составляющими третьего и пятого порядка и обозначаются, как IMD₃ и IMD₅ [1].

В [4] для УМ класса F₃ были исследованы зависимости IMD₃ от P_{in} двухтонального сигнала с частотами $f_1 = 1,9475$ ГГц и $f_2 = 1,9525$ ГГц. Вместе с тем вопрос влияния P_{in} на уровни составляющих IMD₃ и IMD₅ и УМ класса F₃₅ остается не выясненным.

В данной работе был исследован УМ класса F₃₅ (рис. 1), выполненный на основе нитрид-галиевого (GaN) транзистора CGH6008D. Входная согласующая цепь усилителя (рис. 1) проектировалась на максимум передачи мощности с генератора на затвор транзистора, что достигалось в процессе моделирования усилителя подбором длин (L) отрезков микрополосковых линий передачи $TL'_1 - TL'_4$ и TL'_8, TL'_9 . Напряжение смещения на затворе транзистора было выбрано равным $V_{GG} = -4,5$ В, что соответствовало углу отсечки равном $\theta_c = 90^\circ$. Напряжение питания составляло $V_{DD} = 28$ В.

Транзистор CGH60008D является бескорпусным [5]. Поэтому для соединения его затвора и стока с входной и выходной цепью усилителя были использованы проводники, представляющие собой золотые проволочки длиной 1089 мкм и диаметром 25 мкм. Каждое соединение включало в себя три параллельно соединенных проволочки. Резистор R_1 (рис. 1) установлен для предотвращения самовозбуждения усилителя. Для подавления паразитных помех, которые могут поступать в цепь смещения и цепь питания усилителя, от посторонних источников излучения были установлены емкости $C'_{BYPASS1}$, $C'_{BYPASS2}$ и $C_{BYPASS1}$, $C_{BYPASS2}$ (рис. 1). Емкости $C'_{DC\ BLOCK}$ и $C_{DC\ BLOCK}$ установлены для развязки по постоянному току. В качестве материала, на котором изготавливались входная согласующая цепь и выходная нагрузочная цепь усилителя был использован фольгированный материал марки ФЛАН-2,8 с толщиной диэлектрика $h = 1,985$ мм.

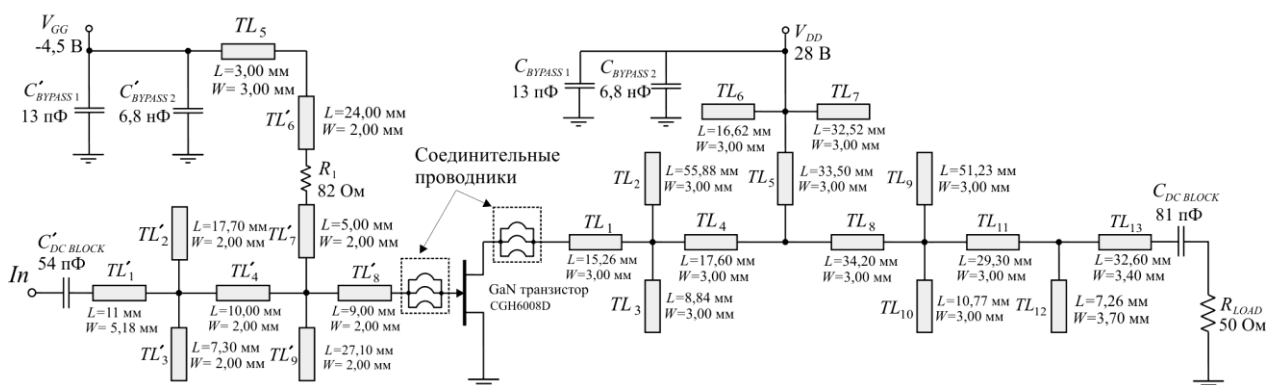


Рисунок 1. Электрическая схема СВЧ УМ класса F₃₅

Нагрузочная цепь, используемая в усилителе (рис. 1), была предложена в [6]. Данная цепь позволяет с учетом выходной емкости (C_{OUT}) и индуктивности (L_{OUT}) транзистора получить на кристалле транзистора импедансы, соответствующие высокоэффективной работе УМ класса F₃₅ [6]. Значения L и ширины (W) отрезков микрополосковых линий передачи $TL_1 - TL_{13}$ вычислялись, используя выражения, приведенные в [6] исходя из рабочей частоты 1,6 ГГц, $C_{OUT} = 0,64$ пФ, $L_{OUT} = 0,41$ нГн, сопротивления нагрузки $R_{LOAD} = 50$ Ом и требуемой выходной мощности $P_{OUT} = 39,03$ дБм. При моделировании усилителя расчетные значения L и W были оптимизированы на максимальные значения η_D и P_{OUT} . Необходимость оптимизации параметров нагрузочной цепи была вызвана существованием неоднородностей (стыков) в местах соединений линий передачи. Моделирование выполнялось в программе AWR Microwave Office 2011.

В изготовленном усилителе максимум η_D был на частоте 1,58 ГГц. Сдвиг рабочей частоты, на 20 МГц относительно расчетной частоты 1,60 ГГц, можно объяснить неточностью изготовления нагрузочной цепи. На частоте $f_1 = 1,58$ ГГц (однотональный сигнал) при $P_{in} = 25,7$ дБм экспериментально были получены $\eta_D = 74,5$ % и $P_{OUT} = 38,8$ дБм. Макет изготовленного усилителя показан на рис. 2.

При экспериментальном исследовании зависимостей IMD_3 и IMD_5 от P_{in} двухтонального сигнала на вход усилителя подавался сигнал с частотами $f_1 = 1,580$ ГГц и $f_2 = 1,585$ ГГц. В случае, когда P_{in} лежит в пределах от 21,5 дБм до 22,5 дБм, уровни составляющих IMD_3 и IMD_5 практически неизменны (рис. 3). Минимальное значение IMD_3

находится на уровне -21,4 дБн, когда $P_{in} = 21,5$ дБм. Уровень IMD_5 при этом составляет -19,4 дБн, а η_D равен 74,6% при $P_{OUT} = 36,4$ дБм. При увеличении P_{in} от 22,5 дБм до 23,5 дБм происходит рост составляющей IMD_3 с -21,5 дБн до -19,7 дБн. Составляющая IMD_5 при этом уменьшается с -19,3 дБн до -20,4 дБн. Значение P_{OUT} увеличивается с 36,9 дБм до 37,2 дБм, а η_D возрастает от 73,8% до 74,9% (рис. 3). При $P_{in} = 23,3$ дБм может быть достигнут компромисс между уровнями составляющих IMD_3 и IMD_5 , поскольку $IMD_3 = IMD_5 = -20,2$ дБн. В этом случае $\eta_D = 74,8 \%$ при $P_{OUT} = 37,1$ дБм.

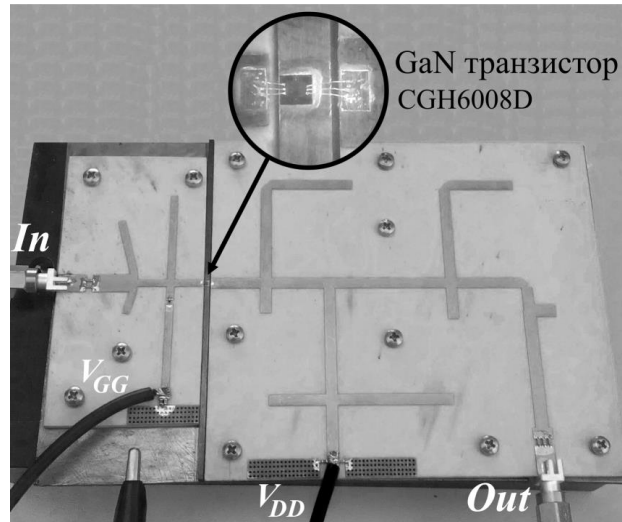


Рисунок 2. Экспериментальный макет УМ класса F₃₅

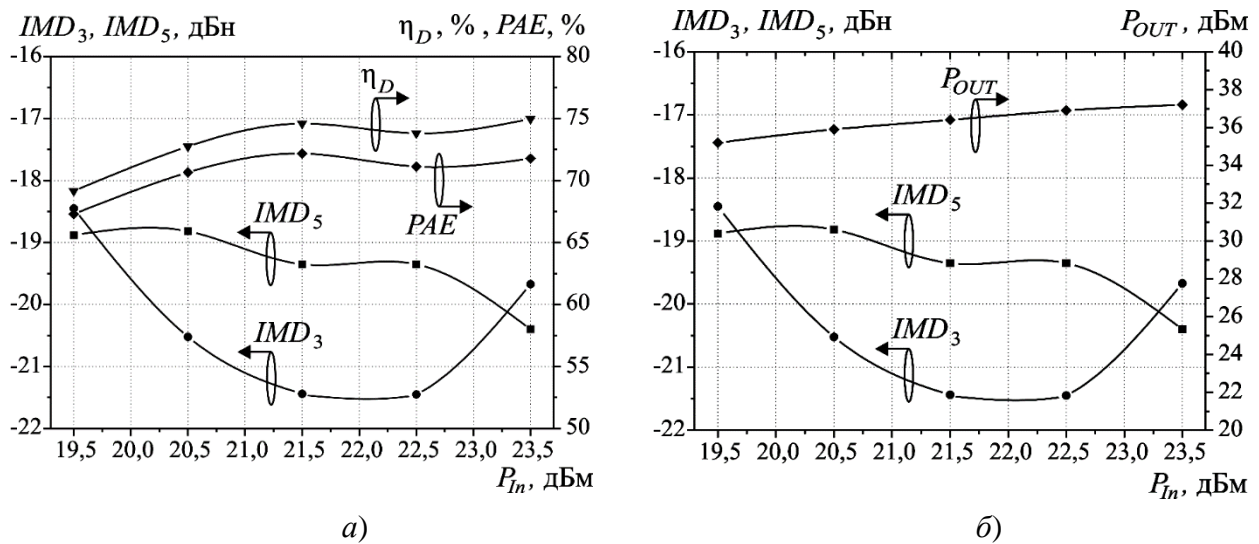


Рисунок 3. Зависимости IMD_3 , IMD_5 , η_D , PAE от P_{in} (а) и IMD_3 , IMD_5 , P_{OUT} от P_{in} (б) для УМ класса F₃₅

Отметим, что уровень составляющих $IMD_3 = IMD_5 = -20,2$ дБн, полученный в данной работе, практически такой же, как и уровень $IMD_3 = -20,0$ дБм, полученный в [4] для УМ класса F₃. В [4] вместо η_D вычислялся КПД по добавленной мощности (*Power-Added Efficiency (PAE)*), который составил 66%. Однако в нашем случае для УМ класса F₃₅ получен $PAE = 71,5\%$ (рис. 3 а), что на 5,5% выше $PAE = 66 \%$, полученного для УМ класса F₃. Поэтому можно ожидать,

что УМ класса F_{35} , благодаря большему значению PAE по сравнению с УМ класса F_3 , способен получить более широкое практическое применение.

Библиографический список

1. Kazimierzczuk M.K. RF Power Amplifiers / M.K. Kazimierzczuk // – USA: Wiley. –2008. – P.403.
2. Colantonio P. High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifiers / P. Colantonio, F. Giannini, E. Limiti // – USA: Wiley. – 2009. – P.520.
3. Raab F. H. Maximum Efficiency and Output of Class-F Power Amplifiers / F. H. Raab // – IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. – 2001. – Vol. 49, №6. – pp. 1162-1166.
4. Ohta A. Inter-modulation Distortion Analysis of Class F and Inverse Class F Amplifiers at Low Quiescent Currents / A. Ohta, A. Inoue, S. Goto, K. Ueda, T. Ishikawa, Y. Matsuda // – 34th European Microwave Conference, Amsterdam 2004. – pp. 1453-1456.
5. CGH60008D. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.datasheetarchive.com>.
6. Yefymovych A.P. Load network design technique for microwave class-F amplifier / A.P. Yefymovych, V. G. Krizhanovski, R. Giofrè, P. Colantonio // – MIKON 2014, 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, June 16-18, Gdansk, Poland.– pp. 439-441.