



цепи стока обеспечивает высокий импеданс на рабочей частоте, что позволяет достичь максимального усиления при минимальном вкладе теплового шума по сравнению с резистивными аналогами. Ступенчатая регулировка усиления реализована путём дискретного изменения сопротивления нагрузки. Цифровое управление 3-битным кодом при помощи блока *COD\_1V8* и матрицы транзисторных ключей  $GC<0> - GC<7>$  позволяет адаптировать параметры МШУ под уровень входного воздействия. Это предотвращает насыщение последующих узлов приёмного тракта и обеспечивает рост линейности ( $IIP3$  до  $-6,8$  дБм) при минимальном усилении. На рисунке 2 представлена частотная зависимость выходных параметров МШУ при максимальном коэффициенте усиления.

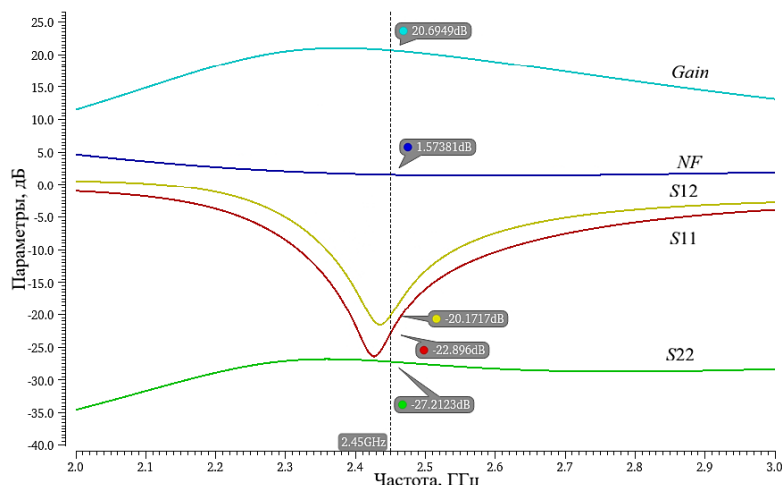


Рисунок 2 – Выходные параметры малошумящего усилителя при максимальном усилении

Пиковые значения характеристик на частоте 2,45 ГГц обусловлены резонансными свойствами стокового  $LC$ -контура. Полученные значения  $S_{11} = -22,9$  дБ и  $S_{22} = -20,2$  дБ свидетельствуют о высоком качестве импедансного согласования с 50-омным трактом, достигнутом путём оптимизации геометрии транзисторов и применения внешних согласующих цепей на базе дискретных компонентов. Высокая обратная изоляция ( $S_{12} = -27,2$  дБ) и общая устойчивость характеристик в полосе 2,4–2,5 ГГц обеспечены применением каскодной архитектуры, которая минимизирует влияние эффекта Миллера. Основные параметры усилителя и существующих аналогов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Выходные параметры малошумящих усилителей

Параметры	Тех. задание	Результат, 28 нм	180 нм [3]	130 нм [4]	28 нм [5]
$Gain$ , дБ	$G_{max} \geq 15$	10 ... 20,7	4 ... 34	2,8 ... 23,6	15,2
$NF_{min}$ , дБ	$\leq 2$	1,57	1,2	2,1	2,8
$IIP3 (G_{max} - G_{min})$ , дБм	$IIP3(G_{min}) \geq -10$	-12,5 ... -6,8	-15*	-10,8 ... -8,2	-4,6
$P_{DC}$ , мВт	$\leq 18$	15,3	12	9,9	4,5
$FoM (G_{max})$ , мВт $^{-1}$	–	2,51	51	14,9	7,08

\*Значение  $IIP3$  для [3] рассчитано по формуле  $P1dB + 10$  дБ

В работе представлено схемотехническое решение МШУ для диапазона 2,4–2,5 ГГц, реализованное по технологии 28-нм  $FD-SOI$ . Использование каскодной архитектуры с цифровой регулировкой усиления позволило по результатам моделирования достичь коэффициента шума 1,57 дБ при усилении 20,7 дБ и энергопотреблении 15,3 мВт. Значение  $FoM = 2,51$  мВт $^{-1}$  (интегральный критерий качества, учитывающий соотношение усиления, коэффициента шума и потребляемой мощности [2]) уступает показателям аналогов [3–5] вследствие различных целевых задач и особенностей реализации каждого из решений. Однако разработанное решение является единственным, сочетающим низкий уровень шума (1,57 дБ), цифровую регулировку и реализацию по 28-нм КНИ технологии, что подтверждает его конкурентоспособность для современных систем связи.

#### Список использованных источников:

1. Das, T. *Practical Considerations for Low Noise Amplifier Design : White Paper RFLNAWP [Электронный ресурс] / T. Das ; Freescale Semiconductor, Inc. – 2013. – Режим доступа: [www.nxp.com](http://www.nxp.com). – Дата доступа: 22.03.2026.*
2. Razavi, B. *RF Microelectronics / B. Razavi. – 2nd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2011. – 936 p.*
3. Ximenes, A. R. *A CMOS Continuous Variable Gain Low-Noise Amplifier (LNA) for WLAN Applications / A. R. Ximenes, J. W. Swart // Proceedings of the 24th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI). – 2011. – P. 5–9.*
4. de Souza, M. *Digitally Controlled CMOS Low Noise Amplifier for Adaptive Radio / M. de Souza. – Ph.D. dissertation – Université de Bordeaux / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. – 147 p.*
5. Bozorg, A. *A 0.02 – 4.5 GHz LN(T)A in 28-nm CMOS for 5G Exploiting Noise Reduction and Current Reuse / A. Bozorg, R. B. Staszewski // IEEE Journal of Solid-State Circuits – 2021. – Vol. 56, No. 2. – P. 404–415.*