

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Кучерук В.В.<sup>1,2</sup>, Лебедев Н.В.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия (197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49), e-mail: kucheruk.vladimir@gmail.com

<sup>2</sup>ООО «Аргус-ЭТ», Санкт-Петербург, Россия (196128, г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 2), e-mail: DGI@arguset.com

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, Россия (197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), e-mail: nikitalebedev.11@yandex.ru

В данной работе изложен подход к разработке и моделированию приёмопередающего канала малошумящего усилителя мощности. Показана возможность систем автоматизированного проектирования при использовании компьютерной модели в качестве макета для изготовления экспериментального образца с последующим применением в составе различных телекоммуникационных и радионавигационных систем. Проведен расчет модели малошумящего усилителя мощности (МШУ) миллиметрового диапазона длин волн, при котором была освоена методика моделирования согласующих цепей, и был произведен анализ зависимости шумовых характеристик усилительного каскада. В результате измерения коэффициента шума был выбран метод, который на практике подтвердил правильность моделирования. Особое внимание уделено процессу настройки и обработки результатов измерения коэффициента шума на анализаторе спектра Rohde&Schwarz ZVA24.

Ключевые слова: малошумящий усилитель мощности (МШУ), моделирование, коэффициент шума, формула Фрииса.

## APPLICATION INVESTIGATION AND THE LOW-NOISE AMPLIFIER MODELING FOR MILLIMETER-WAVE.

Kucheruk V.V.<sup>1,2</sup>, Lebedev N.V.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, Saint Petersburg, Russia (197101, Saint Petersburg, 49 Kronverksky Pr.), e-mail: kucheruk.vladimir@gmail.com

<sup>2</sup>Argus-ET, Saint Petersburg, Russia (196128, Saint Petersburg, st. Blagodatnaya 2), e-mail: DGI@arguset.com

<sup>3</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia (197376, Saint Petersburg, st. Professora Popova 5), e-mail: nikitalebedev.11@yandex.ru

In this article the approach to the low-noise amplifier receiver's development and modelling is represented. The possibility of computer-assisted design system by using a computational model as a experimental model for constructing a representative is shown for further usage as a part of different telecommunicational and radio-navigational systems. The Low-Noise Amplifier (LNA) computing of millimeter-wave wavelength was made, where in the modeling technique of match circuit was absorbed, and the analysis of dependence of amplification stage noise characteristic was made. As a result of noise ratio measurements the right method was chosen, which practically has proved the correctness of modelling. Special focus is on the controls process of noise ratio observation reduction on the analyzer Rohde&Schwarz ZVA24.

Keywords: low-noise amplifier (LNA), modeling, noise figure, Friis formula.

Разработка малошумящего усилителя (МШУ) СВЧ-диапазона является достаточно непростой задачей. Ускорить проектирование и улучшить качественные показатели усилителей позволяет комплекс программ систем автоматизированного проектирования, которые сейчас в большом количестве представлены на рынке. В них реализованы процедуры «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей, а также пассивных корректирующих и согласующих цепей. Рассмотрим в данной статье процесс проектирования

усилителей с согласующими цепями, содержащего два основных этапа: 1) построение в заданной частотной области допустимых значений импеданса и коэффициента отражения согласующих цепей, исходя из требований к характеристикам усилителя; 2) синтез (определение структуры и значений элементов) согласующих цепей [6].

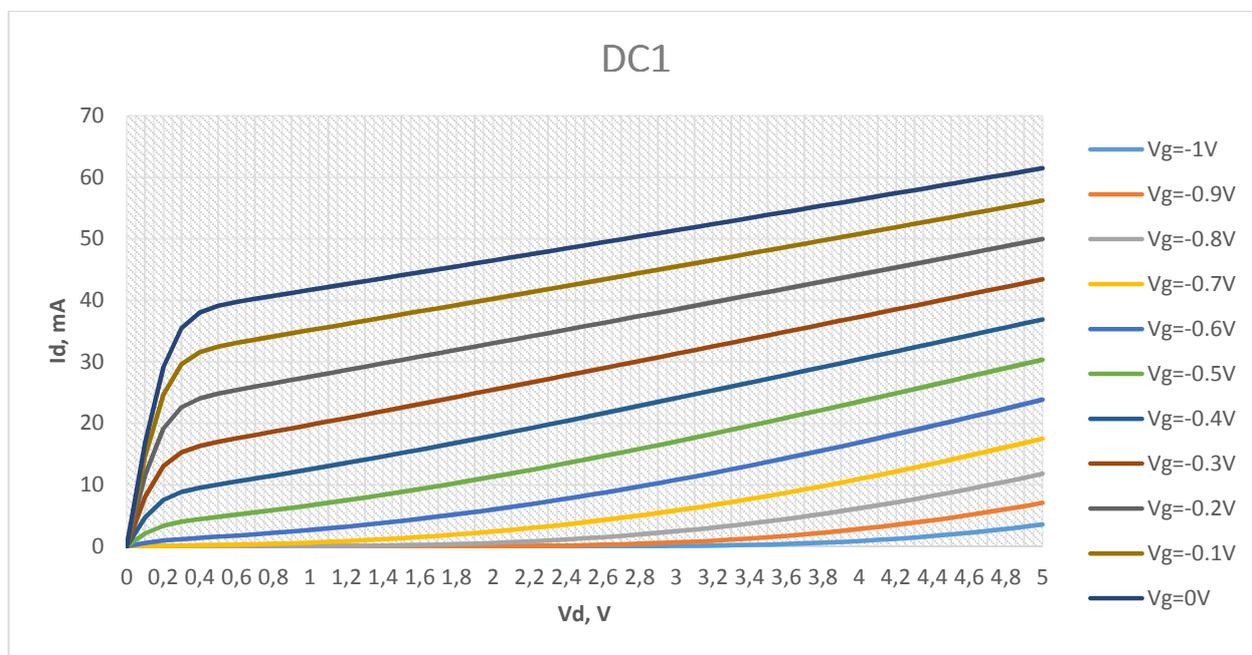
Усилитель выполняется на основе материала Taconic TLY 5. Требуемые параметры разрабатываемого усилителя представлены в таблице 1.

**Таблица 1**

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Значение
Коэффициент усиления	G	дБ	не менее 20
Коэффициент шума	NF	дБ	не более 1,9
Частотный диапазон	$\Delta f$	ГГц	9,9 – 10,4

### Моделирование

Для обеспечения необходимого коэффициента усиления и шума были выбраны транзисторы NE3210S01. В процессе анализа требований была выбрана топология двухкаскадного усилителя для обеспечения необходимого уровня выходной мощности. Проектирование модели маломощного усилителя мощности начинается с получения необходимых вольт-амперных характеристик транзистора и расчета согласующих цепей на 50 Ом на входе и на выходе транзистора, чтобы определить рабочую точку [7].



*Рис. 1. График зависимости тока стока от напряжения стока транзистора*

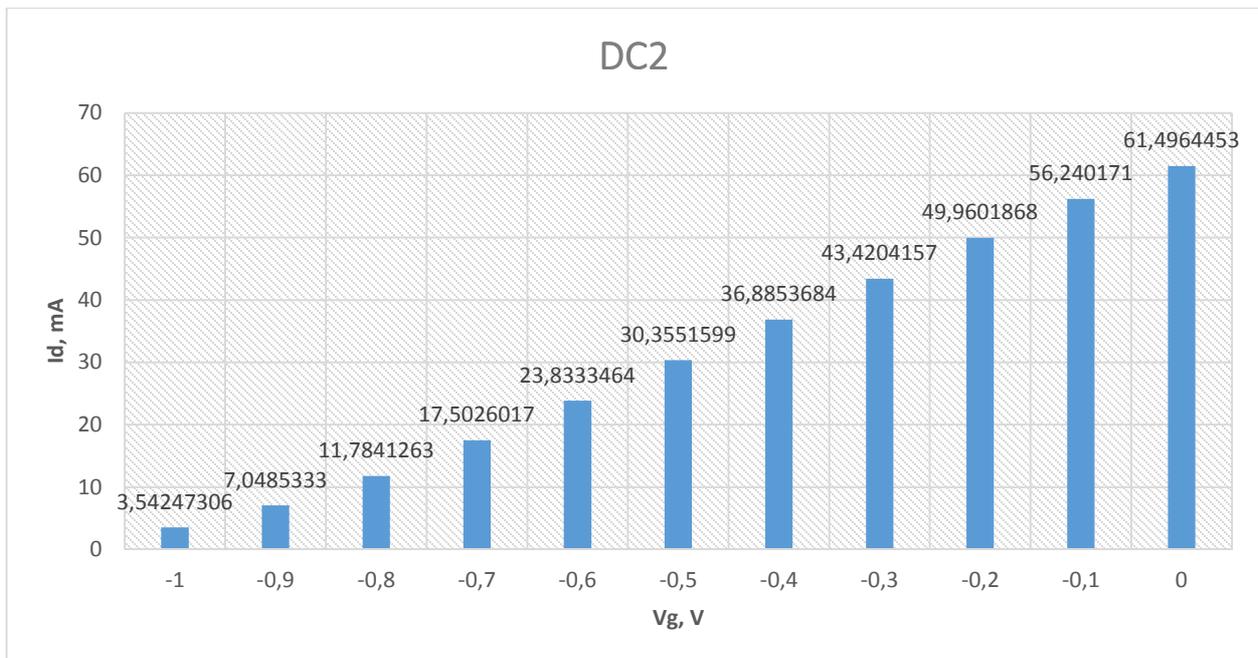


Рис. 2. График зависимости тока стока от напряжения на затворе транзистора

Получая выходные данные по моделированию работы транзистора, мы можем видеть, что при рекомендуемом напряжении на стоке  $U_{ds}=2\text{В}$ , напряжение на истоке будет в пределах  $U_g = (-0.25 \div -0.4)\text{В}$ .

Как правило, готовый модуль на входе и выходе имеет сопротивления 50 Ом, соответственно отдельно взятый транзистор необходимо согласовать по импедансу на вход и выход, для этого построим согласующие цепи [2]. Обычно цепь согласования представляет собой набор микрополосковых линий, имитирующих ёмкость/индуктивность включенных последовательно/параллельно. Классическим примером может служить построение следующей цепи. Вертикальные шлейфы имитируют емкости, линии с изменяющейся шириной – индуктивности [3].

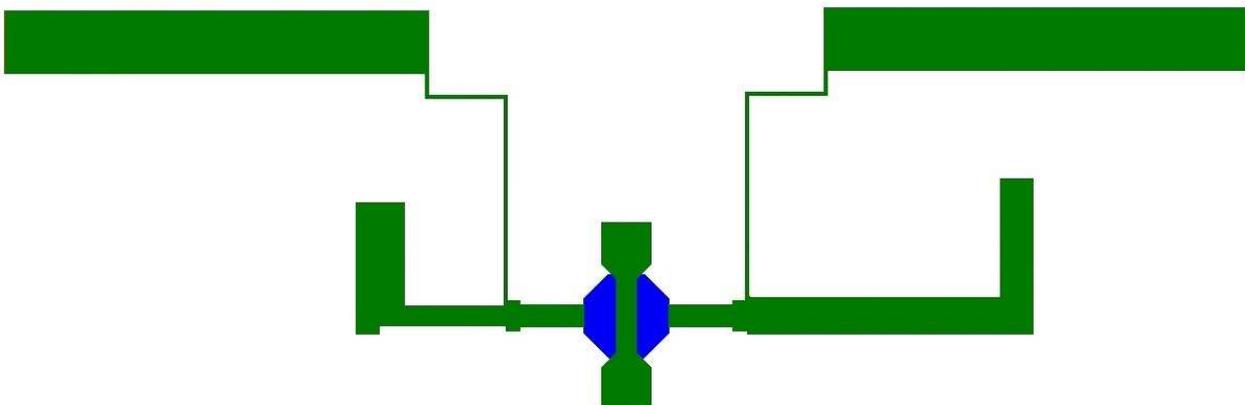


Рис. 3. Общий вид согласующих цепей транзистора

После моделирования согласующих цепочек был проведён частотный анализ разработанной схемы, результаты которого представлены ниже.

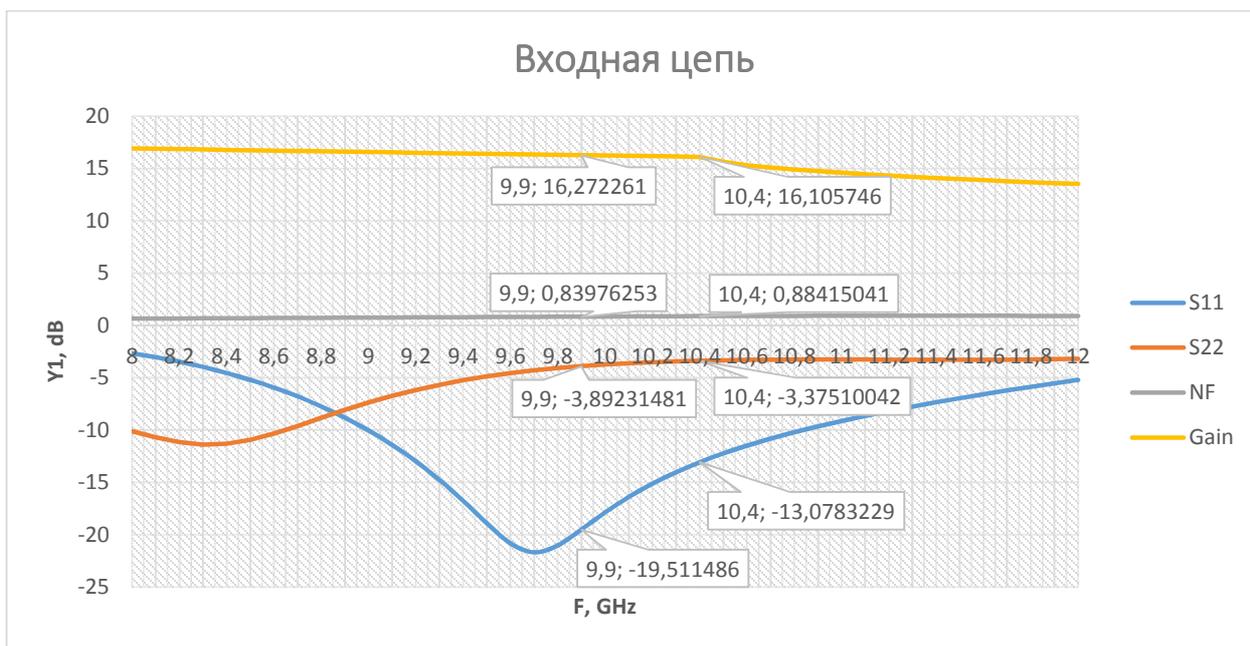


Рис. 4. График согласования цепи транзистора VT1 на входном каскаде

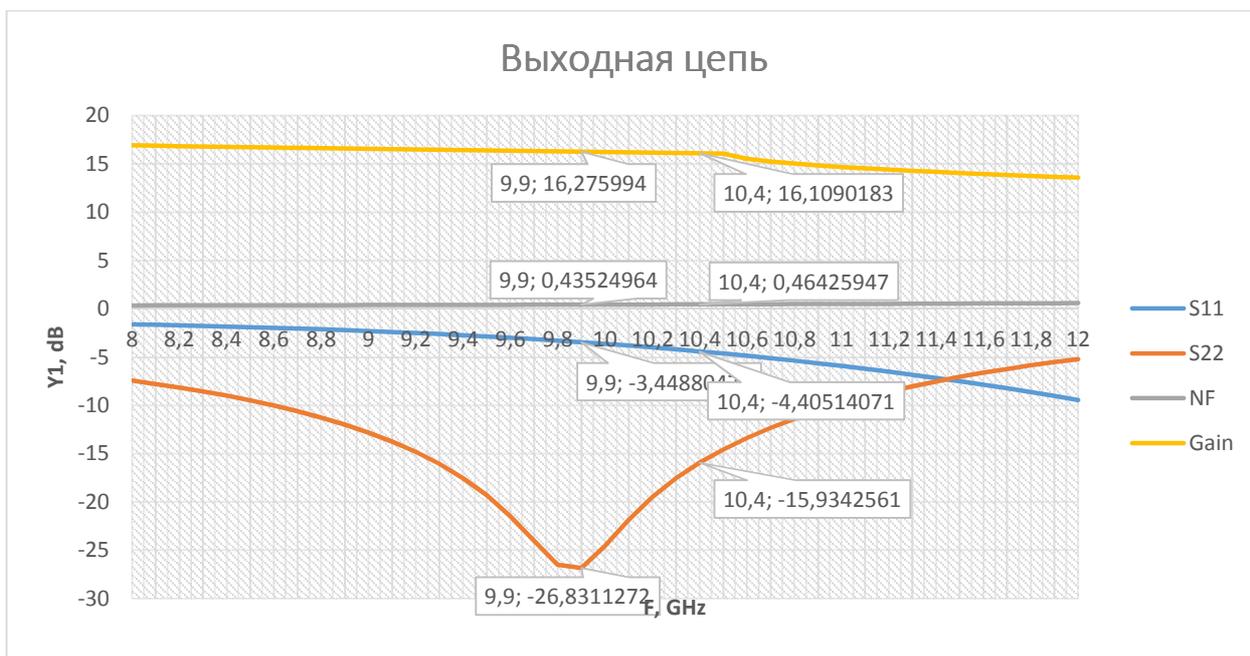


Рис. 5. График согласования цепи транзистора VT2 на выходном каскаде

Согласование транзисторов VT1 и VT2 производится отдельно по причине снижения шумов.

Отношение сигнал/шум - один из важнейших факторов, определяющих качество работы любой радиотехнической системы. Для радиоэлектроники этот параметр тем более важен, что он является фактически единственной доступно измеряемой величиной, характеризующей качество работы всей системы в целом [1].

$$F = \frac{(C/N)_{in}}{(C/N)_{out}} \quad (1.1)$$

или, в логарифмических единицах (дБ),

$$F_{(lg)} = 10 \log \frac{(C/N)_{in}}{(C/N)_{out}} \quad (1.2)$$

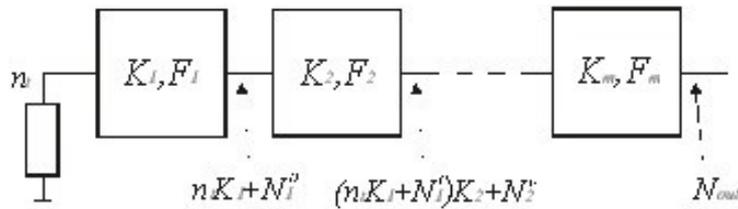


Рис. 6. Коэффициент шума каскадированных устройств

Входной тепловой шум сопротивления, проходя последовательно все элементы, будет усиливаться/ослабляться соответственно коэффициентам передачи устройств  $K_i$ , и к нему будут добавляться собственные шумы всех этих устройств. Поэтому выходной шум нашей цепи будет равен:

$$N_{out} = n_t K_1 K_2 \dots K_m + N_1^0 K_1 K_2 \dots K_m + N_2^0 K_3 \dots K_m + N_{m-1}^0 K_m \dots N_m^0 \quad (1.3)$$

С другой стороны, если бы наша цепочка была идеальной (нешумящей), то выходной шум составил бы  $n_t K_1 K_2 \dots K_m$ . Отсюда в соответствии с определением (1.3) получим коэффициент шума каскадно включенных устройств:

$$F = \frac{n_t K_1 K_2 \dots K_m + N_1^0 K_1 K_2 \dots K_m + N_2^0 K_3 \dots K_m + N_{m-1}^0 K_m \dots N_m^0}{n_t K_1 K_2 \dots K_m} = 1 + \frac{N_1^0}{n_t K_1} + \frac{N_2^0}{n_t K_1 K_2} + \dots + \frac{N_{m-1}^0}{n_t K_1 \dots K_{m-1}} + \frac{N_m^0}{n_t K_1 \dots K_m} \quad (1.4)$$

откуда, вспоминая связь собственного шума и коэффициента шума:

$$N_i^0 = (F_i - 1) n_t K_i \quad (1.5)$$

сразу получим:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \dots + \frac{F_{m-1} - 1}{K_1 K_2 \dots K_{m-2}} + \frac{F_m - 1}{K_1 \dots K_{m-1}} \quad (1.6)$$

Это известная формула, полученная Фриисом еще в 1944 г. Здесь обычно обращают внимание на то, что результирующий коэффициент шума определяется в основном шумами первого каскада, поскольку  $F_1$  входит в формулу без знаменателя, тогда как остальные слагаемые имеют в знаменателях коэффициенты передачи входящих в цепочку устройств. Если бы речь шла исключительно о каскадировании усилителей, для которых, как правило,  $K_i \gg 1$ , то это было бы вполне справедливо [4]. У нас же в качестве звеньев цепи выступают все устройства: как активные элементы - усилители, так и все пассивные элементы - ответвители, аттенюаторы, отрезки коаксиального кабеля, для которых, как уже говорилось выше, коэффициент шума численно равен затуханию и может быть весьма большим. Коэффициент же передачи в этом случае будет существенно меньше единицы. Из этого можно сделать вывод, что для улучшения шумовых свойств цепочки необходимо стремиться к тому, чтобы первый каскад был каскадом усиления с возможно большим усилением и меньшим коэффициентом шума. Проведенный расчет показал, что общий коэффициент шума на два каскада не превышает 0.9 дБ. При моделировании мы можем видеть отличный от расчета по формуле Фрииса результат.

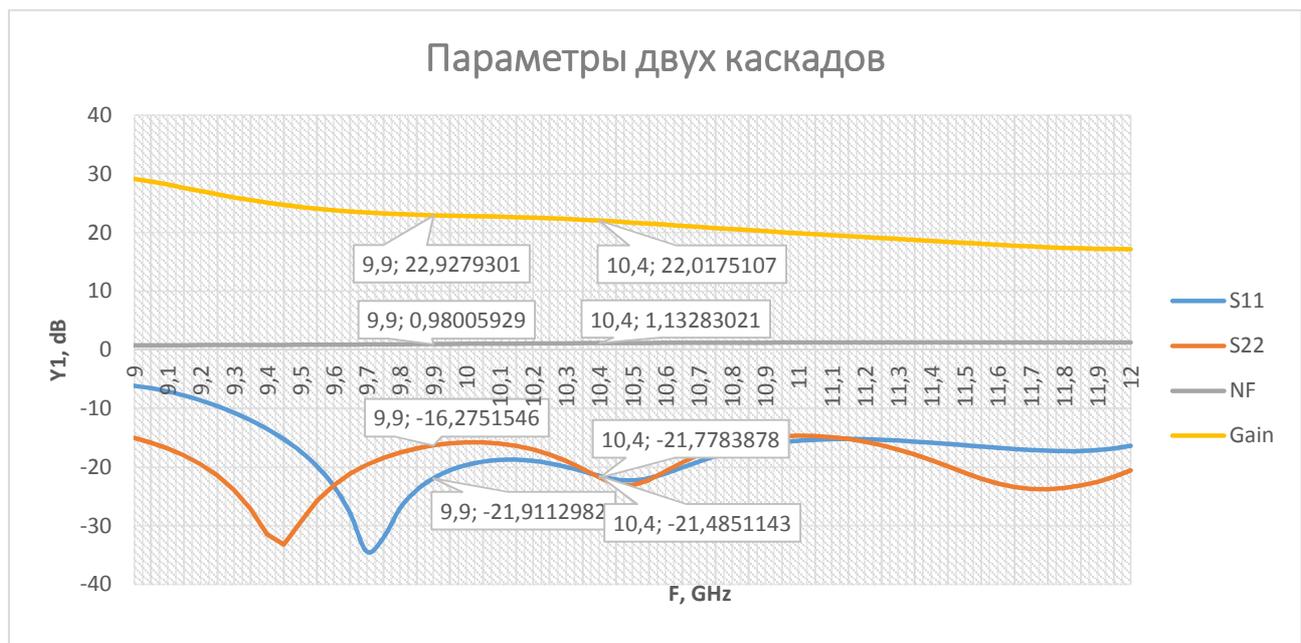
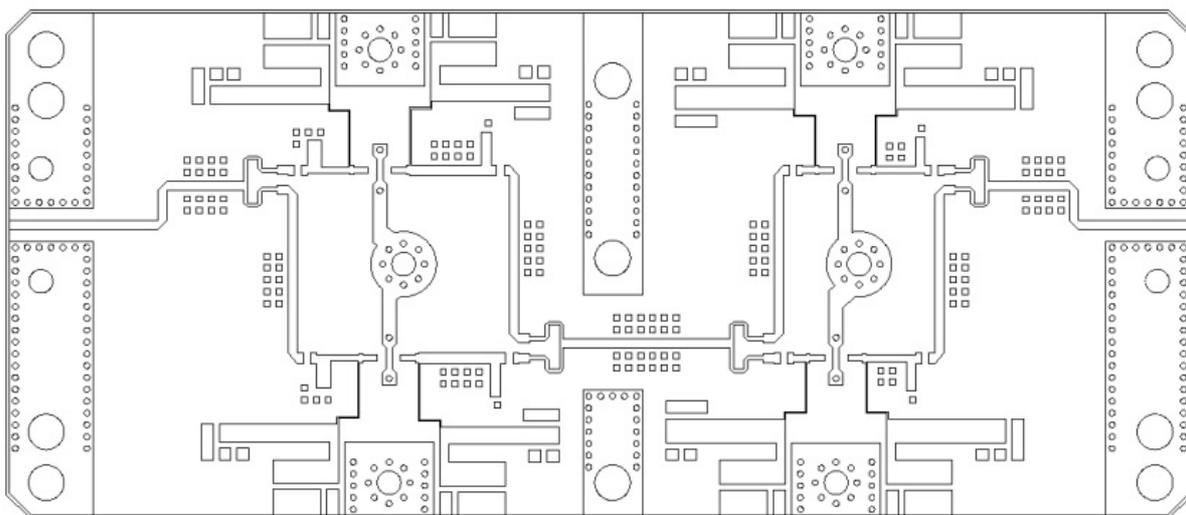


Рис. 7. График расчета коэффициента шума

Как видно из выходных параметров малошумящего усилителя мощности, коэффициент шума лежит в диапазоне значений  $NF = (0.98 \div 1.13)$  дБ. Расхождение значений в 0.2 дБ объясняется наличием в цепи дополнительных микрополосковых линий передачи, делителей мощности, сумматоров.



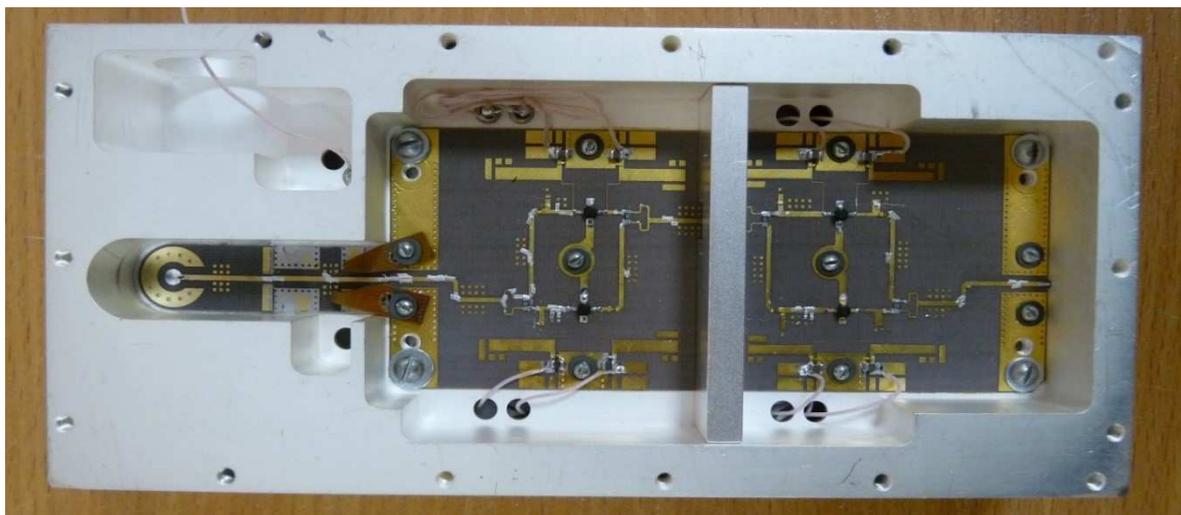
*Рис. 8. Общий вид топологии платы, состоящей из двух каскадов*

Учитывая тот факт, что плата подвергается процессу настройки, были нанесены подстроечные элементы в тех местах, где это необходимо. Для полного описания сформировали следующие слои: Top – верхний слой, Brd – край платы, Bot – основание платы, Via – крепежные отверстия.

### **Измерения**

Для измерений плата МШУ была смонтирована в корпус и подведено питание.

Плата МШУ была изготовлена из материала Taconic TLY 5 толщиной 0.254 мм. Основным достоинством его является гибкость и возможность формирования большого количества сквозных металлизированных отверстий. Материал платы обладает следующими свойствами: диэлектрическая постоянная  $\epsilon_r = 2,20$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 0.0009$ .



*Рис. 9. Фотография готового образца МШУ в корпусе*

Измерения проводились на анализаторе спектра ZVA24. Были получены следующие результаты: на характеристике коэффициента усиления  $S_{21}$  не наблюдается значительных неравномерностей в диапазоне, на кривых  $S_{11}$  и  $S_{22}$  отсутствуют какие-либо выбросы в форме пиков и интермодуляционных искажений. Отметим, что в ходе измерений на крышку корпуса крепился поглотитель, что обусловило гладкость кривых  $S$ -параметров.

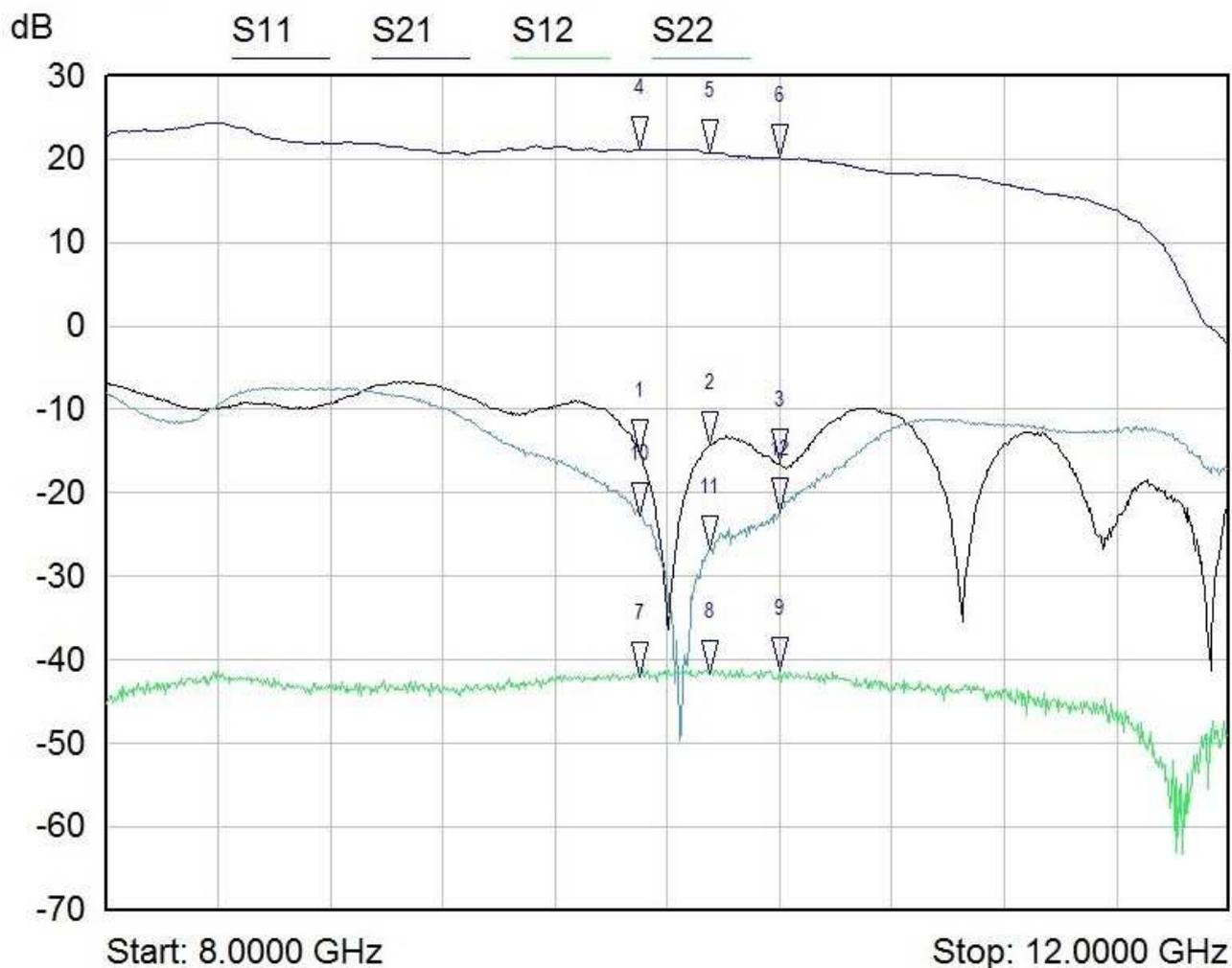
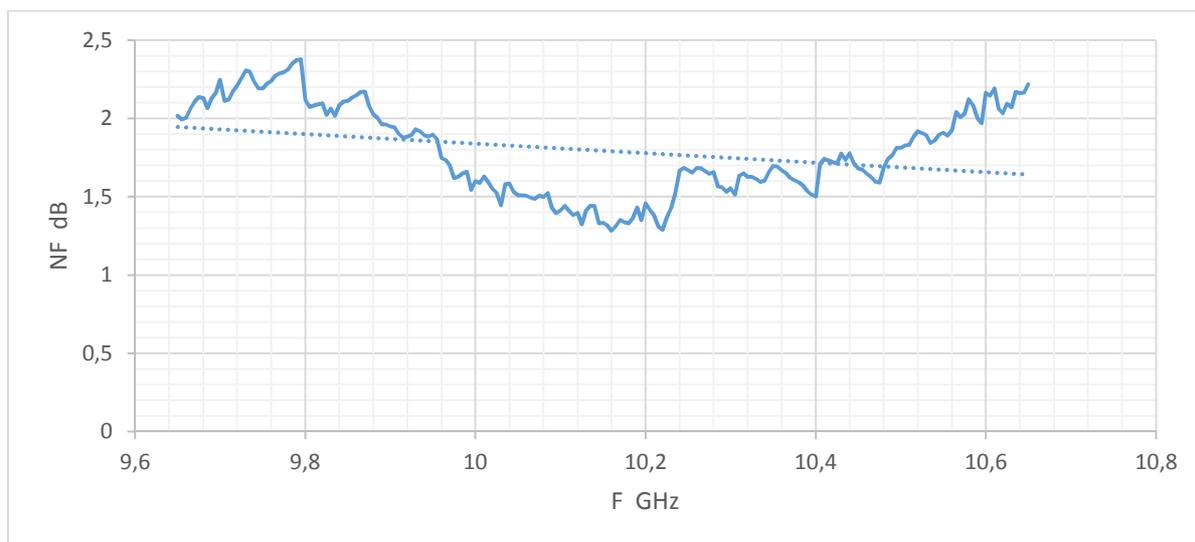


Рис. 10. График «Измеренные электрические параметры МШУ»:  $S_{11}$  – КСВн входа МШУ;  $S_{21}$  – коэффициент усиления МШУ;  $S_{12}$  – развязка между входом и выходом МШУ;  $S_{22}$  – КСВн выхода МШУ

### Измерение коэффициента шума. Метод Y-фактора

Для измерения шума был использован метод Y фактора, являющийся основой большинства измерений коэффициента шума, [5] выполняемых внутренними средствами анализатора коэффициента шума как в ручном, так и автоматическом режимах. Цель любого измерения шума состоит в нахождении его среднего значения на выходе устройства. Эти значения с соответствующими поправками могут использоваться для вычисления фактического коэффициента шума устройства. В ходе измерения коэффициента шума малошумящего усилителя мощности диапазона 9.9–10.4 ГГц был

получен график, на котором представлена кривая мгновенного значения коэффициента шума и линия усредненного значения.



*Рис. 11. График «Измеренная шумовая характеристика МШУ»*

Более широкая полоса измерения дает лучший результат усреднения, поскольку в широкой полосе содержится больше шумовых событий в единицу времени и, следовательно, больше событий участвует в усреднении. Обычно коэффициент шума следует измерять с возможно более широкой полосой, но не шире, чем полоса испытуемого устройства.

### **Заключение**

В данной работе результаты моделирования и примененная технология согласования транзистора с волноведущим трактом показали хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов. Полученные результаты в целом укладываются в требования технического задания. Погрешность можно объяснить следующим: плата после измерений подвергалась доработке, производилась настройка КСВн входа и выхода, что не могло не отобразиться и на шумовой характеристике. В результате измерения коэффициента шума был выбран метод, который на практике подтвердил правильность моделирования, но была выявлена погрешность, которую в ходе дальнейших исследований предстоит минимизировать. Погрешность моделирования коэффициента шума заключается в том, что методика задания составляющей теплового шума в расчете достаточно неочевидна. В процессе настройки платы было замечено, что коэффициент шума малошумящего усилителя мощности зависит от КСВн входа усилителя, поскольку, уменьшая отражение на входе, мы увеличиваем поглощение СВЧ-волны вместе с шумом. Шум, как и сигнал, проходя через структуру, подвергается усилению, соответственно мы можем наблюдать увеличение значения коэффициента шума.

## Список литературы

1. Вольман В.И. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. - М. : Радио и связь, 1982.
2. Дьяконов В.П., Маскимчук А.А., Ремнев А.М., Смердов В.Ю. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. - М. : Солон-Р, 2002.
3. Руденко В.М., Халяпин Д.Б., Магнушевский В.Р. Малошумящие входные цепи СВЧ приемных устройств. - М. : Связь, 1971.
4. Чеботаренко О. О шумах в сетях кабельного телевидения // Теле-Спутник. – 2005. - 2 (112) февраль. - URL: <http://www.telesputnik.ru/archive/112/article/88.html>.
5. Rodríguez Sebastián, Correa Andrés, Fajardo Arturo, Paez Carlos. Design and Implementation of a LNA in UHF band using Microstrip. Department of Electronics Pontificia Universidad Javeriana (PUJ), 2011.
6. Stephen A. Maas. Nonlinear Microwave and RF Circuits. Second Edition. Artech House Boston, London, 2003.
7. Keysight Technologies. Noise Figure Measurement Accuracy – The Y-Factor Method. Application Note. 2009. - URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5952-3706E.pdf>.

### Рецензенты:

Баранов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой физики, Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики НИУ ИТМО, г. Санкт-Петербург;

Головков А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиоэлектронных средств, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург.