

SECTION 26. Radio-technique. Electronics. Telecommunications.

Alexander Andreevich Samuilov

Junior Researcher,
Laboratory of Intellectual Computer Systems of TUSUR, Russia
samuilovaa@gmail.com

Igor Miroslavovich Dobush

Dr.-Ing., Senior Researcher,
Laboratory of Intellectual Computer Systems of TUSUR, Russia
igadobush@gmail.com

Aleksey Anatolevich Kalentev

Junior Researcher,
Laboratory of Intellectual Computer Systems of TUSUR, Russia
alexey.kalentyev@gmail.com

**DESIGN OF 0.9-2.1 GHZ LOW-NOISE AMPLIFIER ON PRINTED CIRCUIT BOARD
USING VISUAL DESIGN TOOLS**

***Abstract:** The design flow of 0.9-2.1 GHz low-noise amplifier (LNA) on printed circuit board using a suite of «visual» CAD tools is described. LNA is implemented. Comparison of LNA simulation and measurement results is presented.*

***Keywords:** low noise amplifier, pHEMT, «visual» design, CAD tools, matching network.*

***Citation:** Samuilov AA, Dobush IM, Kalentev AA (2014) DESIGN OF 0.9-2.1 GHZ LOW-NOISE AMPLIFIER ON PRINTED CIRCUIT BOARD USING VISUAL DESIGN TOOLS. ISJ Theoretical & Applied Science 9 (17): 145-152. doi: <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2014.09.17.25>*

УДК 621.375.4

**РАЗРАБОТКА МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ДИАПАЗОНА 0,9-2,1 ГГЦ НА
ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ
«ВИЗУАЛЬНОГО» ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

***Аннотация:** Описывается процедура разработки малошумящего усилителя (МШУ) диапазона частот 0,9-2,1 ГГц на печатной плате с помощью комплекса программ «визуального» проектирования СВЧ транзисторных усилителей. Проведено сравнение результатов моделирования МШУ с измерениями.*

***Ключевые слова:** малошумящий усилитель, pHEMT, «визуальное» проектирование, комплекс программ, согласующая цепь.*

Введение

Задача разработки широкополосных малошумящих усилителей (МШУ) СВЧ диапазона является достаточно трудоемкой. Методика «визуального» проектирования [1, 2] позволяет упростить решение данной задачи. Она основана на декомпозиционном методе синтеза (ДМС) [3] – систематическом подходе к проектированию активных СВЧ устройств, согласно которому требования к устройству преобразуются в требования к входящим в его состав корректирующим (КЦ) и согласующим цепям (СЦ) в виде областей допустимых значений (ОДЗ) иммитанса или коэффициента отражения на фиксированных частотах. Далее КЦ и СЦ синтезируются по заданным ОДЗ. Такой подход представляет собой

единую основу для решения широкого класса задач, встречающихся при проектировании линейных и нелинейных ВЧ и СВЧ полупроводниковых устройств.

Проектирование многокаскадных усилителей с помощью ДМС состоит из последовательного построения ОДЗ коэффициентов отражения источника сигнала и нагрузки для каждого активного элемента (АЭ) по требованиям к характеристикам, заданным в виде неравенств, и синтеза СЦ по этим ОДЗ. При этом, входной импеданс СЦ является нагрузкой предыдущего каскада, а выходной импеданс СЦ выступает в качестве импеданса для последующего каскада.

Таким образом полный контроль комплекса характеристик многокаскадных СВЧ усилителей возможен лишь в том случае, если задавать ОДЗ одновременно и для входного и для выходного иммитансов СЦ. Методика «визуального» проектирования позволяет проектировать цепи одновременно по ОДЗ входного и выходного иммитансов цепи. Это позволяет на основе единого «визуального» подхода проектировать многокаскадные СВЧ транзисторные усилители по комплексу требований, включая коэффициенты усиления, шума, отражения, устойчивости.

Методика «визуального» проектирования реализована в виде комплекса программ, включающего программы построения ОДЗ иммитанса или коэффициента отражения по заданным требованиям к устройству Amp и Region, а также программу синтеза КЦ и СЦ по заданным ОДЗ Locus.

В настоящей работе продемонстрировано сочетание «визуальной» методики синтеза цепей, согласующих активное сопротивление генератора с комплексным импедансом нагрузки, и методики синтеза цепей для согласования двух частотно-зависимых комплексных импеданса генератора и нагрузки при проектировании двухкаскадного МШУ с помощью комплекса программ «визуального» проектирования СВЧ транзисторных усилителей.

«Визуальное» проектирование усилителей с согласующими цепями. Задача согласования заключается в определении структуры и элементов четырехполюсной цепи, которая будет обеспечивать (с определенным допуском) требуемую частотную характеристику $G(\omega)$ передачи мощности от генератора $Z_S(\omega)$ в нагрузку $Z_L(\omega)$ в полосе частот $[\omega_L, \omega_U]$.

Задачу синтеза КЦ и СЦ можно решить с помощью «визуального» подхода, который ранее был рассмотрен в [2, 4]. Он состоит из двух основных этапов:

1. Определение на ряде фиксированных частот $\omega_k (k = \overline{1, m})$ рабочего диапазона областей допустимых значений (ОДЗ) E_k иммитанса КЦ (СЦ), исходя из комплекса требований к характеристикам усилительного каскада, включая коэффициенты усиления и шума, уровни согласования на входе и выходе, устойчивость и др.

2. Проектирование (синтез) пассивного КЦ (СЦ) таким образом, чтобы его импеданс $Z(\omega)$ на частотах ω_k попадал в соответствующие ОДЗ E_k , т.е.

$$Z(\omega_k) \in E_k, k = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Задача нахождения ОДЗ иммитанса КЦ (СЦ) по комплексу требований к характеристикам усилителя решается с помощью программ Amp и Region [4-6]. Построение ОДЗ на первом этапе позволяет исследовать задачу проектирования с точки зрения влияния КЦ (СЦ) на характеристики усилителя и реализуемости комплекса требований к усилителю, выбрать оптимальный тип и ширину затвора транзистора, режим по постоянному току и др. [4, 5].

Интерактивная «визуальная» процедура синтеза КЦ и решения задачи одностороннего согласования по ОДЗ иммитанса реализуется в программе Locus [7, 8]. В этом случае допустимые области E_k и годограф импеданса КЦ (СЦ) $Z(\omega)$ одновременно отображаются на экране монитора (рис. 1). Выбор структуры КЦ (СЦ) осуществляется путем сопоставления расположения ОДЗ E_k на плоскости иммитанса, построенных на нескольких фиксированных частотах ω_k , с годографами различных цепей в библиотеке

Locus [7]. После выбора структуры пользователь в интерактивном режиме добивается попадания точек годографа иммитанса цепи $Z(\omega)$ на заданных частотах ω_k в соответствующие ОДЗ E_k . Для этого он может указывать и перемещать с помощью «мыши» точку годографа (значение иммитанса цепи) на выбранной (опорной) частоте, а также изменять величины управляемых элементов цепи с помощью движков тюнера. При этом контролируются значения всех элементов цепи.

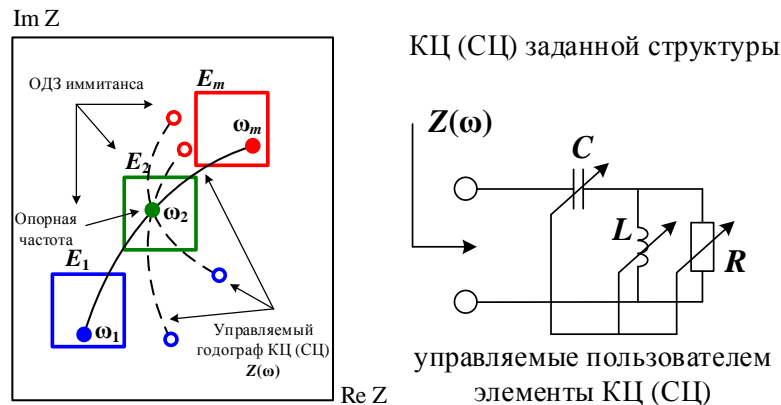


Рисунок 1 - Процесс нахождения значений элементов КЦ (СЦ) с заданной структурой.

Методика синтеза цепей для согласования двух комплексных нагрузок была описана в [9]. Согласно данной методике, ОДЗ и годографы цепей могут отображаться на плоскостях входного и выходного иммитансов или коэффициентов отражения (рис. 2), при этом пользователь выбирает одну или несколько цепей, для которых выводятся годографы. Одновременно могут рисоваться до пяти годографов (в зависимости от существования решений для той или иной структуры цепи), которые проходят через заданную точку Z_{ref} на опорной частоте ω_{ref} . Пользователь добивается попадания всех точек хотя бы одного из годографов в заданные ОДЗ. При этом, структура и параметры цепи частично рассчитываются аналитически по формулам, приведенным в [9]. Часть элементов является управляемыми. Они могут быть включены последовательно или параллельно на входе и (или) выходе цепи. При этом, пользователь сам указывает либо выбирает в ходе проектирования способ включения (последовательный или параллельный) и тип (индуктивность, емкость, линия передачи, холостой или короткозамкнутый шлейф) дополнительного управляемого элемента. Величины указанных элементов устанавливаются с помощью тюнеров.

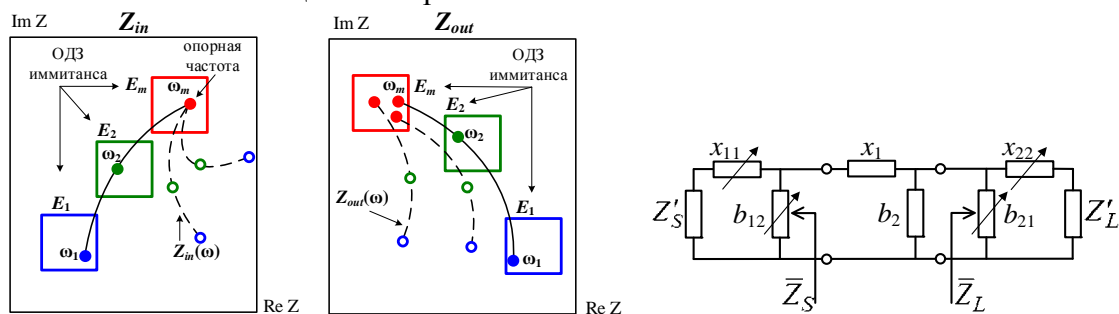
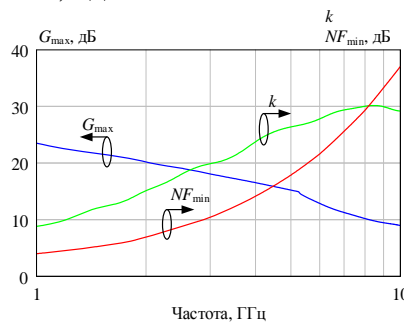


Рисунок 2 - Процесс нахождения значений элементов СЦ при решении задачи двустороннего согласования.

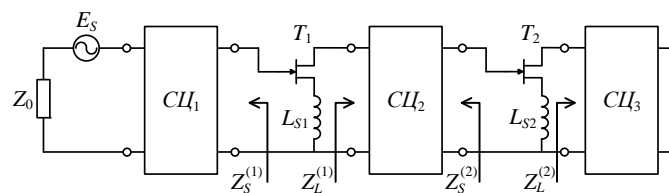
Проектирование МШУ на печатной плате. Опишем процесс проектирования МШУ на печатной плате с помощью комплекса программ «визуального» проектирования СВЧ транзисторных усилителей. К усилителю предъявляются следующие требования: полоса частот: $\Delta f = 0,9-2,1$ ГГц, коэффициент усиления $G > 30$ дБ; неравномерность АЧХ

$\Delta G = 3$ дБ, коэффициент шума $NF \leq 0,7$ дБ; модули входного и выходного коэффициентов отражения $|S_{11}| \leq -10$ дБ, $|S_{22}| \leq -10$ дБ; усилитель должен быть безусловно устойчивым во всем диапазоне частот ($k > 1$).

При проектировании в качестве АЭ были использованы GaAs рHEMT транзисторы компании Avago Technologies [10]. На рис. 3а приведены частотные зависимости минимального коэффициента шума NF_{\min} , максимального коэффициента усиления G_{\max} и коэффициента устойчивости k для выбранного экземпляра транзистора. В качестве коэффициента усиления G_{\max} используется максимальный устойчивый коэффициент усиления $G_{\max} = G_{ms} = |S_{21}|/|S_{12}|$, так как в частотном диапазоне 0,9-2,1 ГГц транзистор является потенциально неустойчивыми ($k < 1$). На частоте 2,1 ГГц транзистор имеет минимальный коэффициент шума $NF_{\min} \approx 0,274$ дБ, максимальный коэффициент усиления $G_{\max} \approx 19,9$ дБ.



а)



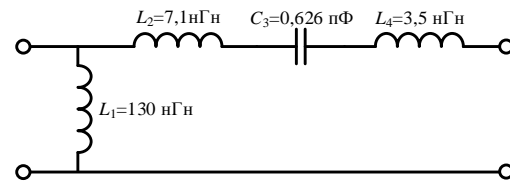
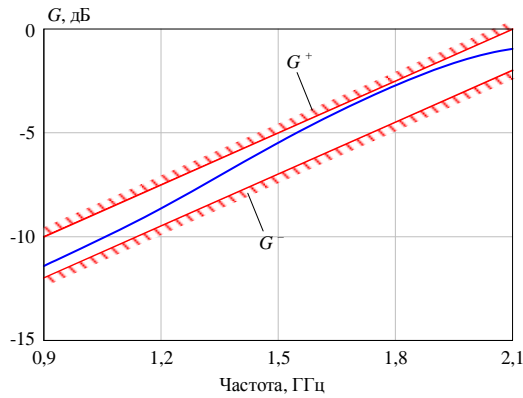
б)

Рисунок 3 – а) частотные характеристики рHEMT транзистора Avago Technologies; б) структурная схема двухкаскадного МШУ.

Анализ усилительных возможностей транзистора в заданных режимах работы показывает, что для обеспечения необходимого коэффициента усиления усилитель должен содержать два каскада. Структурная схема усилителя представлена на рис. 3б. В усилителе используется входная (СЦ₁), межкаскадная (СЦ₂) и выходная (СЦ₃) реактивные согласующие цепи. В обоих каскадах включена последовательная ОС (L_{S1} и L_{S2}) для дополнительного повышения устойчивости и улучшения согласования каскадов по входу ($L_{S1} = L_{S2} = 0,3$ нГн).

Моделирование показало, что четырехполюсник T_1 - T_2 в рабочем диапазоне имеет спад АЧХ приблизительно 10 дБ. Первый этап заключался в синтезе межкаскадной цепи (СЦ₂), корректирующей АЧХ в рабочем диапазоне частот.

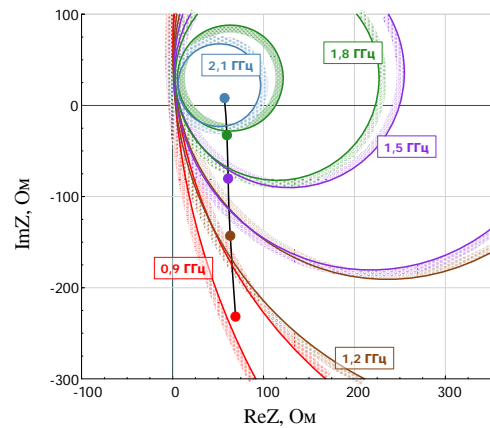
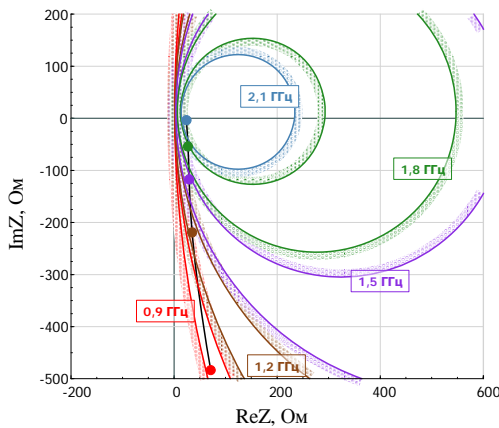
С помощью программы Locus были получены ОДЗ входного ($Z_L^{(1)}$) и выходного ($Z_S^{(2)}$) импедансов СЦ₂ по требованиям к коэффициенту передачи цепи, которые задавались в виде наклонной прямой с подъемом $10 \text{ дБ} \pm 1 \text{ дБ}$ (рис. 4а), по этим ОДЗ была синтезирована межкаскадная СЦ (рис. 4б). При этом, в качестве управляемых элементов были выбраны последовательно включенные разделительный конденсатор и индуктивность на выходе цепи. Значения этих элементов изменялись с помощью тюнеров, а остальные элементы цепи рассчитывались автоматически из решения системы уравнений в [1] таким образом, чтобы годограф проходил через заданную опорную точку на выбранной частоте. В результате была синтезирована цепь, схема которой представлена на рис. 4б. Вид ОДЗ, рассчитанных на заданных частотах программой Locus по требованию к коэффициенту передачи, и годограф синтезированной СЦ₂ на плоскостях входного и выходного импедансов приведены на рис. 5.



а)

б)

Рисунок 4 – а) АЧХ и коэффициент передачи СЦ₂; б) структура СЦ₂.



а)

б)

Рисунок 5 - ОДЗ и годограф импеданса СЦ₂
а) на плоскости $Z_L^{(1)}$; б) на плоскости $Z_S^{(2)}$.

Следующий этап проектирования заключался в расчете входной СЦ₁. Для четырехполюсника Т₁-СЦ₂-Т₂ с помощью программы Region были построены ОДЗ на плоскости $Z_S^{(1)}$ на частотах рабочего диапазона (рис. 6а). При этом задавались требования ко всему усилителя в целом: $30 \text{ дБ} \leq G \leq 33 \text{ дБ}$; $NF \leq 0,7 \text{ дБ}$; $|S_{11}| \leq -10 \text{ дБ}$, $|S_{22}| \leq -10 \text{ дБ}$. По найденным ОДЗ, с помощью программы Locus, была синтезирована входная СЦ₁, содержащая последовательно включенный разделительный конденсатор С₁ и параллельно включенную индуктивность L₂, выполняющую роль цепи питания. Схема и годограф синтезированной цепи представлены на рис. 6а.

Далее, по требованиям к усилителю: $30 \text{ дБ} \leq G \leq 33 \text{ дБ}$; $NF \leq 0,7 \text{ дБ}$; $|S_{11}| \leq -10 \text{ дБ}$, $|S_{22}| \leq -10 \text{ дБ}$, была синтезирована выходная СЦ₃ с учетом входной СЦ₁. Для четырехполюсника СЦ₁-Т₁-СЦ₂-Т₂ в программе Region были построены ОДЗ на плоскости $Z_L^{(2)}$ (рис. 6б) и по ним, с помощью программы Locus, синтезирована выходная СЦ₃. Цепь имеет такую же структуру, что и СЦ₁. Схема и годограф синтезированной цепи представлены на рис. 6б.

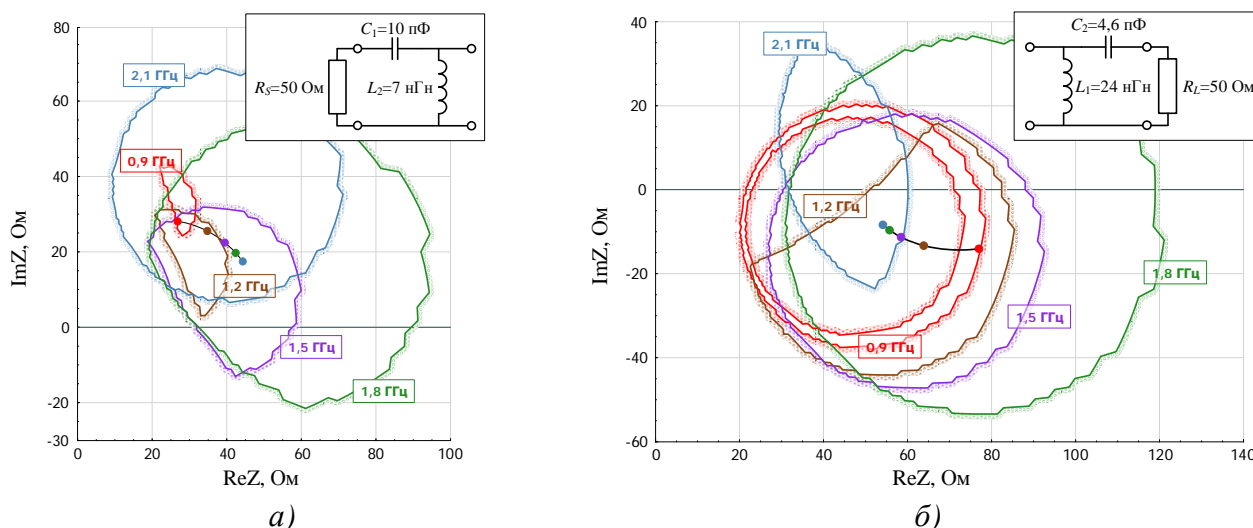


Рисунок 6 - ОДЗ и годограф импеданса а) СЦ₁ на плоскости $Z_S^{(1)}$ и б) СЦ₂ на плоскости $Z_L^{(2)}$ (требования для получения ОДЗ: $30 \text{ дБ} \leq G \leq 33 \text{ дБ}$; $NF \leq 0,7 \text{ дБ}$; $|S_{11}| \leq -10 \text{ дБ}$, $|S_{22}| \leq -10 \text{ дБ}$ в диапазоне частот $f = 0,9-2,1 \text{ ГГц}$).

Далее в схему были добавлены цепи питания и блокировочные конденсаторы, результирующая схема МШУ показана на рис. 7а. Результаты моделирования его частотных характеристик на идеальных элементах представлены на рис. 7б. Разработанный МШУ имеет следующие параметры: коэффициент усиления $G = 31,65 \pm 1,35 \text{ дБ}$, коэффициент шума $NF = 0,69 \text{ дБ}$, коэффициенты отражения на входе $|S_{11}| \leq -9,93 \text{ дБ}$, и на выходе $|S_{22}| \leq -9,81 \text{ дБ}$.

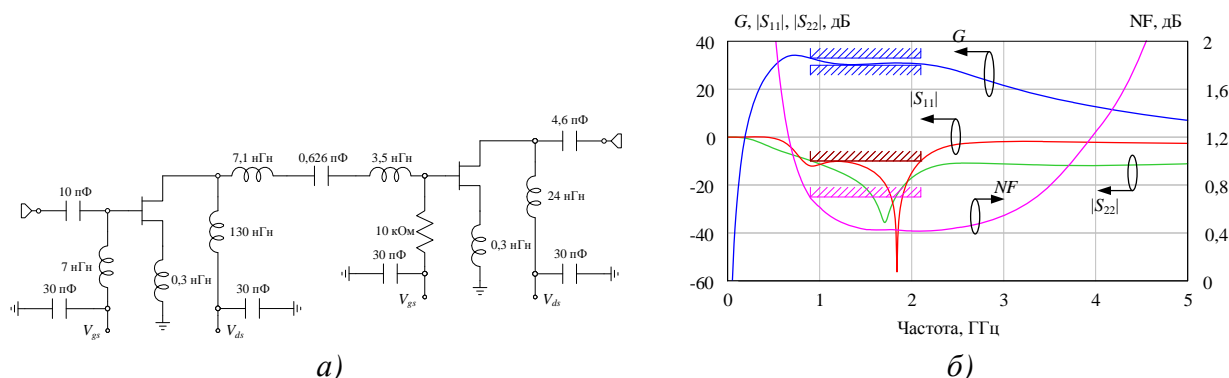
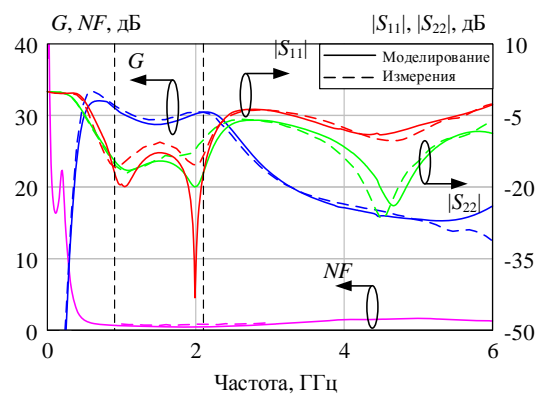
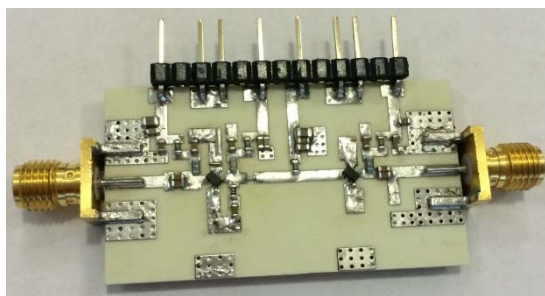


Рисунок 7 - а) принципиальная схема МШУ на идеальных элементах; б) результаты моделирования МШУ на идеальных элементах.

На последнем этапе с помощью программы Microwave Office была проведена оптимизация всех величин элементов и разработана топология МШУ на печатной плате размером $45 \times 25 \text{ мм}^2$. После изготовления МШУ (рис. 8а) были проведены измерения опытного образца усилителя (рис. 8б).



а) **Рисунок 8 - а) фотография опытного образца МШУ (45x25 мм²);**
б) **результаты моделирования и измерений частотных характеристик МШУ**

В табл. 1 приведены требования к основным параметрам МШУ, а также данные моделирования и эксперимента. Как видно, результаты моделирования и эксперимента хорошо совпадают.

Таблица 1
Параметры МШУ на печатной плате: требования, моделирование и эксперимент

	Δf , ГГц	G , дБ	NF , дБ	$ S_{11} $, дБ	$ S_{22} $, дБ
Требования	0,9-2,1	$31,5 \pm 1,5$	$\leq 0,7$	≤ -10	≤ -10
Моделирование	0,9-2,1	$29,9 \pm 1,18$	$< 0,67$	$< -12,81$	$< -14,4$
Эксперимент	0,9-2,1	$30,43 \pm 1$	$\leq 0,87$	$< -10,59$	$< -10,15$

Заключение

Комплекс программ «визуального» проектирования позволяет упростить и ускорить процесс проектирования СВЧ транзисторных усилителей с высокими качественными показателями. Применение интерактивной процедуры синтеза реактивных цепей по ОДЗ входного и выходного иммитансов позволило выполнить на основе единого «визуального» подхода проектирование двухкаскадного СВЧ транзисторного усилителя с реактивными СЦ по комплексу характеристик, включая коэффициенты усиления, шума, отражения, устойчивости.

References:

1. Babak LI, Cherkashin MV (2001) Interactive "visual" design of matching and compensation networks for microwave active circuits. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Phoenix. AZ. pp. 2095–2098.
2. Babak LI, Cherkashin MV, Zaytsev DA (2006) «Vizual'noe» proektirovanie korrektruyushchikh i soglasuyushchikh tsepey poluprovodnikovyykh SVCh-ustroystv. Ch. 1. Opisanie protsedury proektirovaniya. sbornik dokladov TUSUR, No.6 (14), izdatel'stvo TUSUR, pp. 11-23.
3. Babak LI (2001) Decomposition synthesis approach to design of RF and microwave active circuits. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Phoenix AZ, pp. 1167-1170.

4. Cherkashin MV, Eyllier D, Babak LI, Billonnet L, Jarry B, Zaitsev DA, Dyagilev AV (2005) Design of a 2-10 GHz feedback MMIC LNA using «visual» technique. Proc. 35th Europ. Microwave Conf., pp. 1153-1156.
5. Babak LI, Cherkashin MV, Polyakov AYu, Bodunov KS, Dyagilev AV (2005) Programmy «vizual'nogo» proektirovaniya tranzistornykh SVCh usiliteley. Sb. trudov 15-oy mezhd. Krymskoy konf. «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii». T.2, pp. 425–426.
6. Babak LI, Cherkashin MV, Zaytsev DA, Bodunov KS, Kazantsev EV (2007) Kompleks programm «vizual'nogo» proektirovaniya tranzistornykh SVCh usiliteley i passivnykh tsepey. sb. dokladov mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Opyt innovatsionnogo razvitiya». Tomsk: V-Spektr, Ch.2, pp.113-117.
7. Samuilov AA (2012) Programma «vizual'nogo» proektirovaniya korrektruyushchikh i soglasuyushchikh tsepey LOCUS na baze sredy Indesys. Doklady TUSUR. No. 2 (26), pp.119–126.
8. Samuilov AA, Babak LI (2012) Locus Software for «Visual» Design of Correcting and Matching Networks, based on Indesys Environment. Innovations in Information and Communication Science and Technology IICST, pp. 183-189.
9. Samuilov AA, Cherkashin MV, Babak LI (2013) Metodika «vizual'nogo» proektirovaniya tsepey na sosredotochennykh elementakh dlya shirokopolosnogo soglasovaniya dvukh kompleksnykh nagruzok. sbornik dokladov TUSUR, No. 2 (28), izdatel'stvo TUSUR, pp.30-39.
10. Avago Technologies – Analog, Mixed-signal & Optoelectronic Semiconductors (2014) Available: <http://www.avagotech.com> Accessed: 2014 Sep 12.