УДК 621.396.6:004.94 URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1125.html

МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛОВ КОРОТКОВОЛНОВОЙ СВЯЗНОЙ АППАРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ СВОБОДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

А.М. Валякин valyakinam@student.bmstu.ru
И.Д. Присняк prisnyakid@student.bmstu.ru

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация

В статье рассмотрены методы математического моделирования узлов радиоэлектронных устройств коротковолнового диапазона с использованием системы автоматизированного проектирования QUCS-S (Quite Universal Circuit Simulator). Эта система моделирования основана на вычислительном ядре Ngspice и позволяет выполнять анализ электронных схем в частотной области, включая расчет параметров рассеяния. В работе описан подход к моделированию радиотехнических устройств на основе их представления в виде четырехполюсников и анализа S-параметров. Выполнено моделирование частотных характеристик основных узлов радиолюбительского коротковолнового трансивера, включая смесители, полосовые фильтры и усилительные каскады. Приведены способы расчета основных параметров высокочастотных трактов, таких как коэффициент отражения и коэффициент стоячей волны.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, свободное программное обеспечение, трансивер, смеситель, фильтр, усилитель, математическое моделирование, четырехполюсник, S-параметры, коэффициент стоячей волны, добротность

Введение. Для разработки современных радиотехнических устройств необходим точный анализ параметров компонентов еще на этапе проектирования [1, 2]. Применение систем автоматизированного проектирования позволяет существенно сократить время разработки и снизить затраты на изготовление опытных образцов.

Несмотря на широкое распространение коммерческих программных продуктов, таких как MicroCAP и MultiSim [3], их возможности моделирования высокочастотных устройств ограничены. В качестве альтернативы можно использовать систему QUCS-S — кроссплатформенную среду моделирования с открытым исходным кодом, реализованную на основе вычислительного ядра Ngspice [4, 5].

Система QUCS-S поддерживает моделирование S-параметров, анализ в частотной области, применение моделей линий передачи и визуализацию результатов на диаграмме Смита [6]. Это делает программу удобным инстру-

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

ментом для анализа и оптимизации высокочастотных радиоэлектронных устройств.

Метод моделирования. S-параметры представляют собой параметры рассеяния и применяются для описания поведения высокочастотных электрических цепей. Они определяют связь между падающими и отраженными волнами на портах многополюсника [7].

Для двухпортового четырехполюсного устройства (рис. 1) основные элементы матрицы *S* интерпретируются следующим образом:

S_{11} — коэффициент отражения по входу;

S_{21} — коэффициент передачи сигнала от входа к выходу;

S_{12} — коэффициент обратной передачи;

S_{22} — коэффициент отражения по выходу.

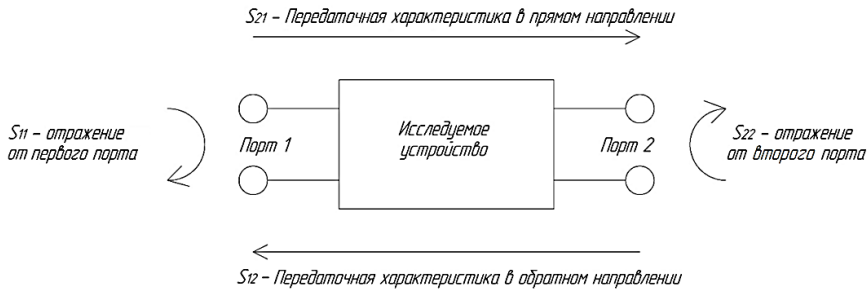


Рис. 1. Прохождение электрического сигнала в четырехполюснике

Коэффициентом отражения ρ называется комплексная величина, определяемая как отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей волны в заданном сечении линии передачи [2]:

$$\rho = \frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}}.$$

В результате интерференции падающей и отраженной волн в линии передачи образуется стоячая волна. Для оценки степени согласования используется *коэффициент стоячей волны*

$$\text{КСВ} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}.$$

При полном согласовании КСВ равен единице.

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Коэффициент стоячей волны связан с коэффициентом отражения ρ [7]:

$$\text{КСВ} = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|}. \qquad (*)$$

Добротность — параметр, характеризующий потери в реактивных *LC*-компонентах на высоких частотах. Для катушки индуктивности она определяется как отношение реактивного сопротивления к активному:

$$Q = \frac{X_L}{R_S}.$$

Чем выше добротность, тем меньше потери энергии в компоненте.

Объект моделирования. В качестве объекта исследования рассмотрена модернизированная схема радиолюбительского коротковолнового трансивера [8]. Устройство предназначено для работы в диапазоне 3…30 МГц и включает несколько функциональных узлов: входной фильтр, смеситель, малошумящий усилитель и усилитель промежуточной частоты (рис. 2–5). Моделирование этих узлов позволяет оценить основные характеристики приемного тракта.

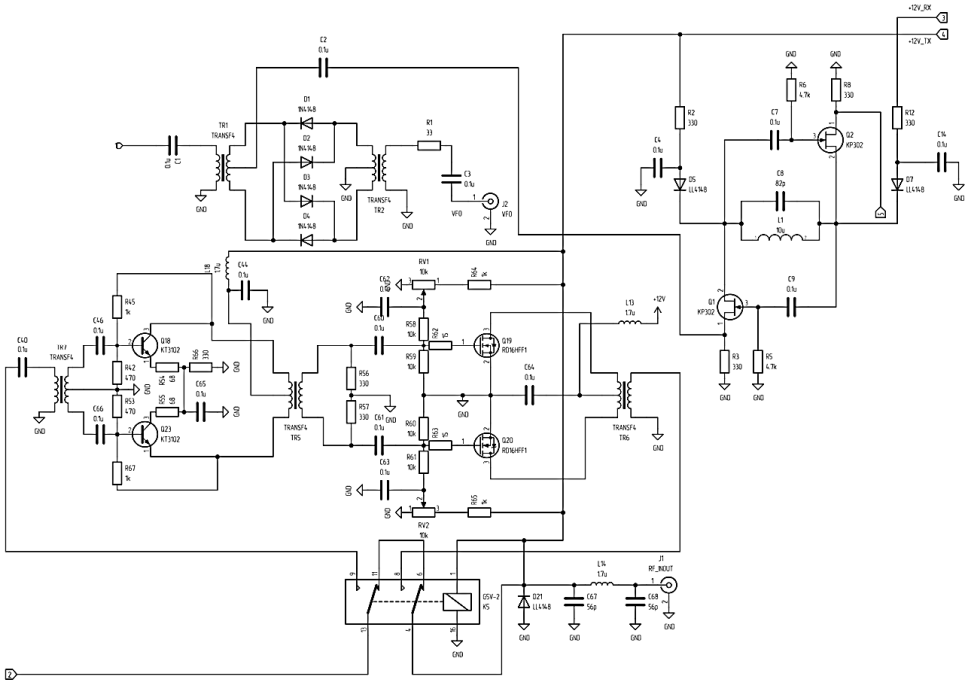


Рис. 2. Электрическая схема трансивера, часть 1

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

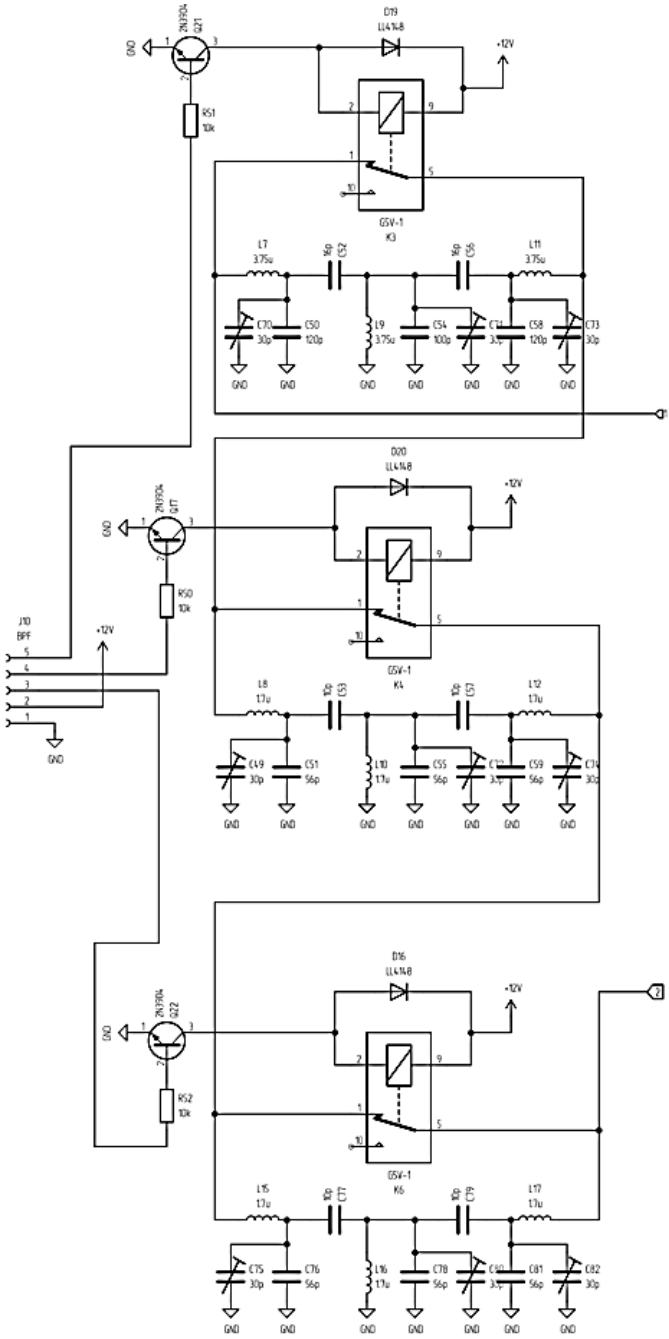


Рис. 3. Электрическая схема трансивера, часть 2

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

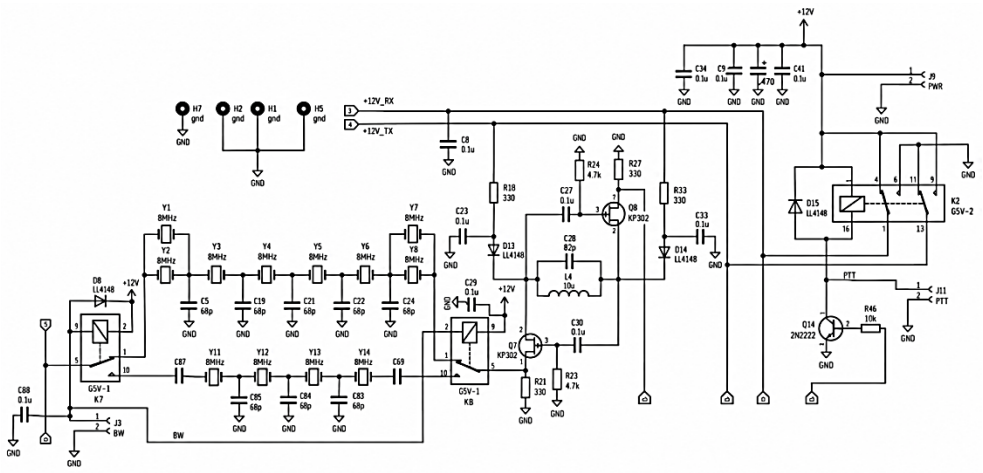


Рис. 4. Электрическая схема трансивера, часть 3

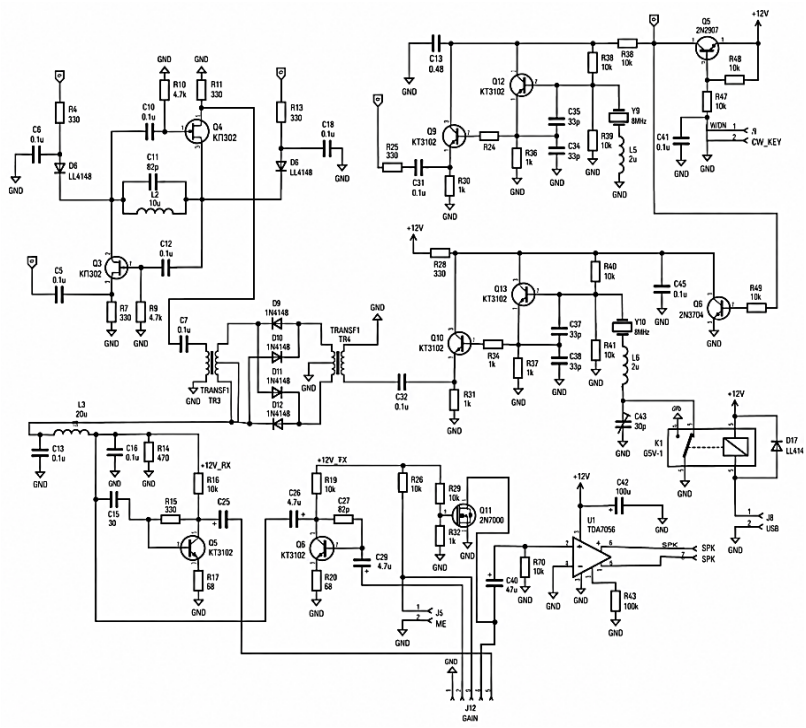


Рис. 5. Электрическая схема трансивера, часть 4

Моделирование смесителя. Смеситель (рис. 6) выполняет преобразование частоты сигнала путем перемножения входного сигнала и сигнала гетеродина [9, 10]. На выходе формируются составляющие суммарной и разностной частоты, одна из которых используется в качестве промежуточной частоты [11]. Моделирование переходного процесса позволяет определить момент установления рабочего режима смесителя (рис. 7).

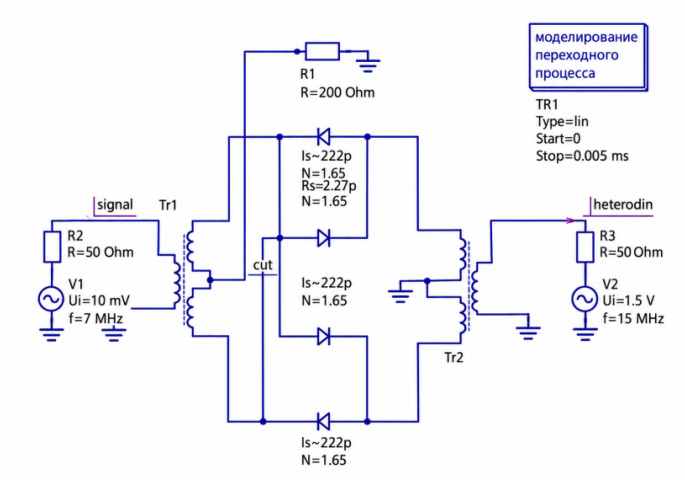


Рис. 6. Схема моделирования смесителя

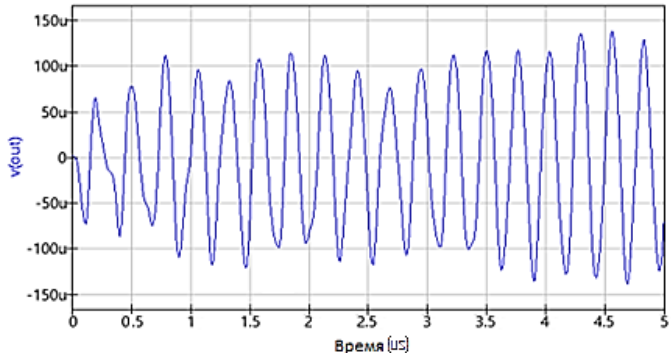


Рис. 7. Результат моделирования переходного процесса смесителя

Моделирование полосового фильтра. Полосовой фильтр предназначен для выделения полезного диапазона частот и подавления внеполосных сигналов [11]. Рассматриваемая схема представляет собой трехконтурный *LC*-фильтр, используемый во входных каскадах коротковолновых приемников (рис. 8).

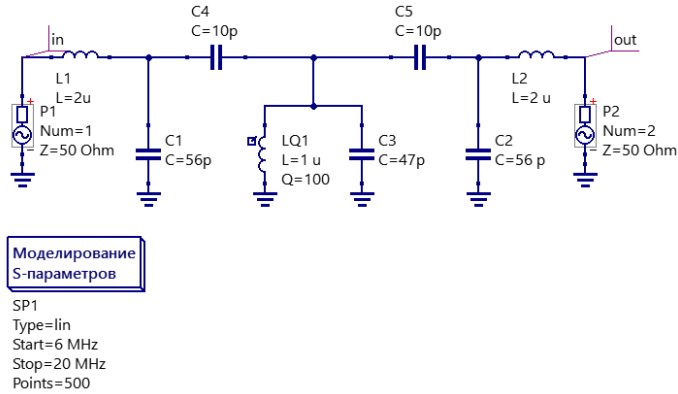


Рис. 8. Схема моделирования фильтра

Для анализа характеристик фильтра использовано моделирование S-параметров в диапазоне частот 10…20 МГц. Полученные частотные характеристики позволяют определить полосу пропускания и уровень затухания вне рабочей области (рис. 9, 10).

При моделировании учитывались потери в индуктивностях и конденсаторах путем задания их добротности [7]. Добротность задается специальным компонентом LQ из раздела радиочастотных компонентов («РЧ-компоненты»). Это позволяет приблизить результаты моделирования к характеристикам реальных компонентов.

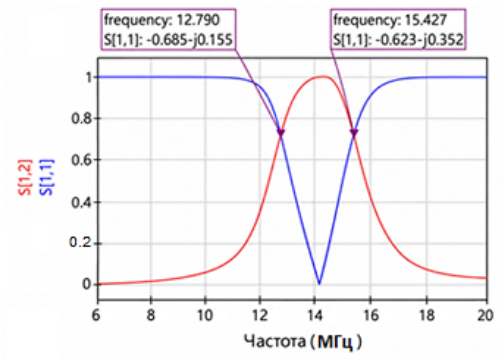


Рис. 9. Результат моделирования фильтра в частотной области

На рис. 9 приведены частотные характеристики фильтра: $S[1, 2]$ (*красная кривая*) и $S[1, 1]$ (*синяя кривая*). Точками на графике отмечены значения параметров, указанные на подписях:

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

– при частоте 12,790 МГц: $S[1, 1] = -0{,}685 - j \cdot 0{,}155$;

– при частоте 15,427 МГц: $S[1, 1] = -0{,}623 - j \cdot 0{,}352$.

Указанные точки соответствуют частотам, на которых наблюдаются минимумы коэффициента передачи $S[1, 1]$ и максимума $S[1, 2]$, что соответствует полосе подавления фильтра.

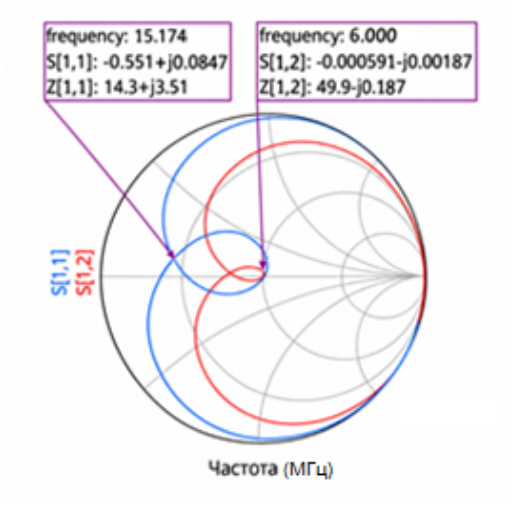


Рис. 10. Диаграмма Вольперта — Смита для фильтра

Диаграмма Вольперта — Смита (рис. 10) с траекториями коэффициентов отражения $S[1, 2]$ (*красная кривая*) и $S[1, 1]$ (*синяя кривая*) представляют результат в комплексной плоскости и используются для оценки согласования по коэффициенту отражения [7]. Выделенные точки соответствуют частотам 15,174 и 6 МГц, для которых даны значения коэффициентов рассеяния $S[1, 1]$ и $S[1, 2]$ и импеданса $Z[1, 1]$ и $Z[1, 2]$ соответственно.

Моделирование усилителя промежуточной частоты. Усилитель промежуточной частоты (УПЧ) реализован на полевых транзисторах и используется в реверсивном режиме [9, 10]. Такое устройство позволяет уменьшить число каскадов устройства и улучшить повторяемость характеристик (рис. 11).

Выполняя моделирование, выведем график S-параметров четырехполюсника для входного и выходного порта.

При моделировании усилителей необходимо определить ток покоя усилителя с помощью режима моделирования рабочей точки, в системе QUCS-S данная функция доступна в меню «Симуляция → Расчет рабочей точки по постоянному току» (рис. 12).

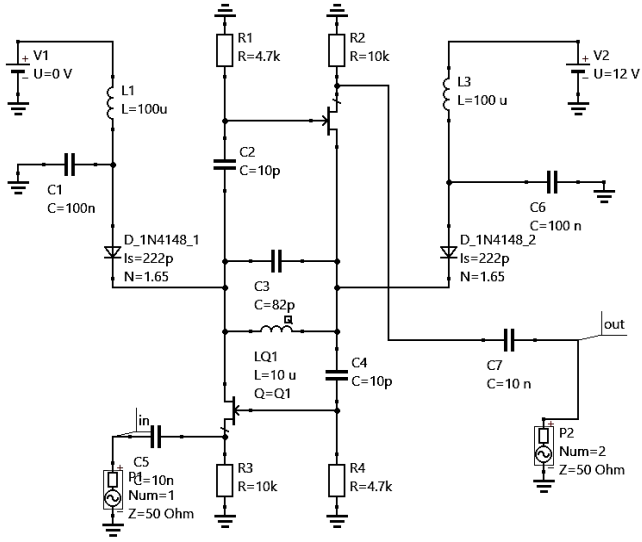


Рис. 11. Схема моделирования реверсивного УПЧ

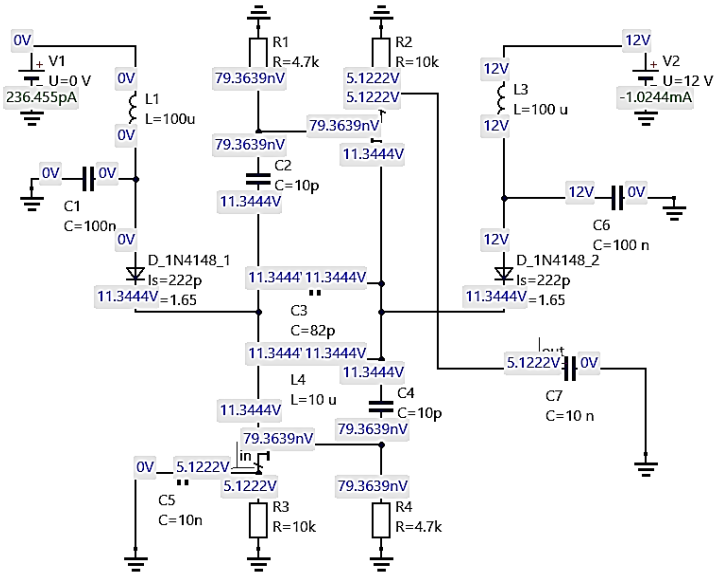


Рис. 12. Расчет рабочей точки реверсивного УПЧ

В системе QUCS-S предусмотрена возможность моделирования с использованием изменяемых параметров. Для реализации подобных вычислений используется компонент «Развертка параметра» из группы «Виды моделирования» (рис. 13), а значение изменяемого параметра задается переменной в блоке Parameter из группы «Уравнения» [6]. В данном случае изменяемым параметром является добротность катушки. Для задания этого параметра используется компонент LQ1, представляющий собой катушку индуктивности с изменяемой добротностью (рис. 14).



Рис. 13. Параметры моделирования реверсивного УПЧ

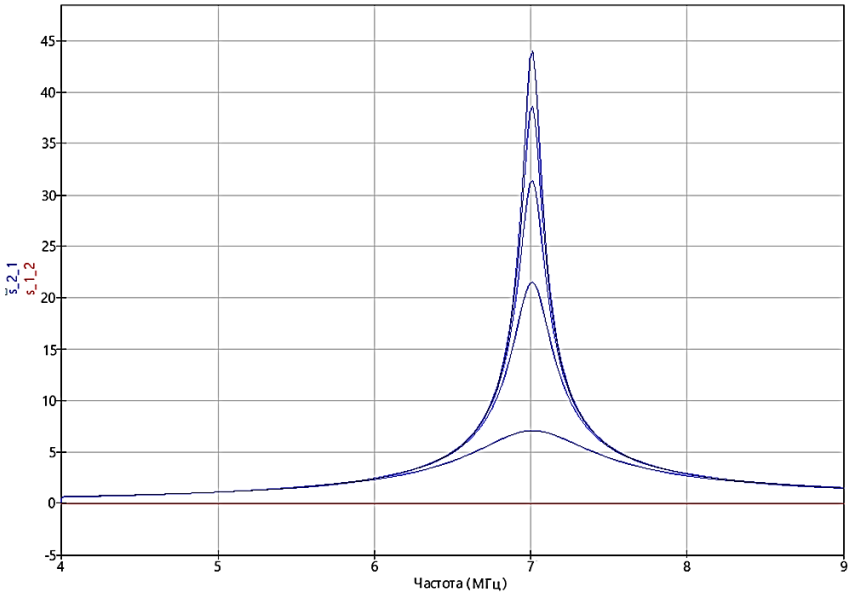


Рис. 14. Результат моделирования реверсивного УПЧ в частотной области с изменяемым параметром добротности

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Для определения КСВ по входу и выходу исследуемого устройства выполняется расчет коэффициентов S_{11} и S_{22} соответственно. Математическое вычисление КСВ на основании выражения (*) реализуется посредством компонента Nutmeg (меню «Вставка — Вставить уравнение») [5].

В настройках данного блока в поле «Моделирование» необходимо установить тип «Моделирование S-параметров» для корректной привязки расчетных векторов к результатам симуляции (рис. 15).

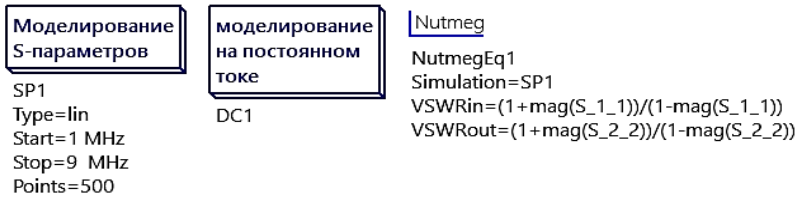


Рис. 15. Параметры моделирования реверсивного УПЧ для расчета КСВ по входу и выходу

Результаты расчета КСВ по входу и выходу усилителя приведены на рис. 16 и 17 соответственно.

Точкой на графике (см. рис. 16) отмечен КСВ усилителя по входу, равный 66,5 при частоте 5.168 МГц. Точкой на графике (см. рис. 17) отмечен КСВ усилителя по выходу, равный 8,58 при частоте 5,120 МГц.

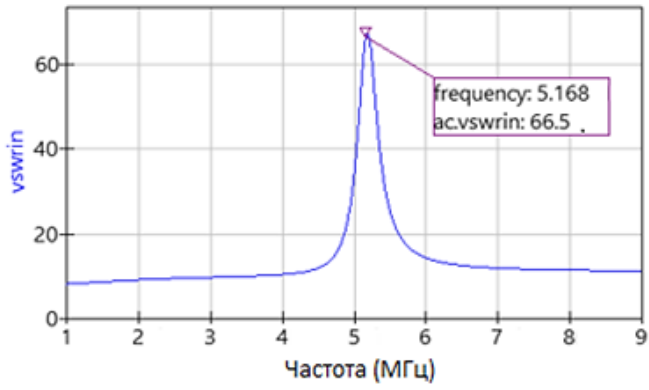


Рис. 16. Результат расчета КСВ усилителя по входу

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

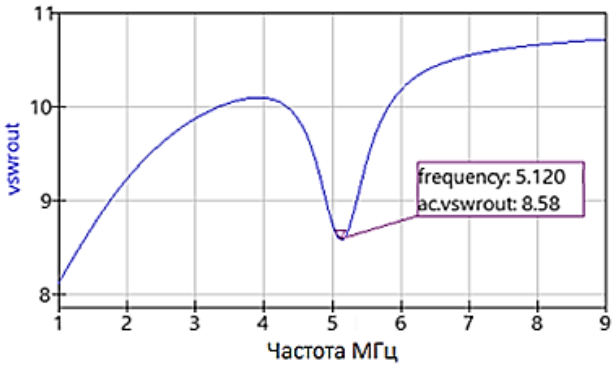


Рис. 17. Результат расчета КСВ усилителя по выходу

Полученные зависимости позволяют оценить степень согласования усилителя по входу и выходу в рассматриваемом диапазоне частот.

Заключение. В работе рассмотрены возможности системы QUCS-S для моделирования узлов коротковолновой радиосвязной аппаратуры. Проведено моделирование смесителя, полосового фильтра, малошумящего усилителя и усилителя промежуточной частоты.

Получены частотные характеристики, S-параметры и частотные характеристики усилительных каскадов. Результаты моделирования позволяют оценить параметры устройств и выявить влияние реальных характеристик компонентов.

Показано, что система QUCS-S может эффективно использоваться для предварительного проектирования радиотехнических устройств. Применение свободного программного обеспечения позволяет снизить стоимость разработки и ускорить процесс проектирования.

Литература

[1] Мощенский Ю.В., Нечаев А.С. *Теоретические основы радиотехники. Сигналы*. Санкт-Петербург, Лань, 2021, 216 с.

[2] Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы*. Москва, Высшая школа, 2005, 462 с.

[3] Разевиг Г.В. *Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 10*. Москва, Горячая линия – Телеком, 2012, 512 с.

[4] Brinson M., Kuznetsov V. Qucs-0.0.19S: A new open-source circuit simulator and its application for hardware design. *2016 International Siberian Conference*

 © МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

on Control and Communications (SIBCON). Moscow, Russia, 2016, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491696

[5] Vogt H., Hendrix M., Nenzi P. *Ngspice User’s Manual Version 42*. 2024. URL: http://ngspice.sourceforge.net/docs/ngspice-manual.pdf (accessed March 15, 2026).

[6] Kuznetsov V.V., Andreev V.V., Lomakin S.A. Semiconductor Device Compact Simulation Taking Into Account the ESD Effect and Using the Free Circuit Simulation Software. *2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. Moscow, Russian Federation, 2025, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10970809

[7] Позар Д.М. *Микроволновая техника*. Москва, Техносфера, 2015, 784 с.

[8] Кузнецов В. *Трансивер на полевых транзисторах*. Клуб RU-QRP, 19 мая 2024. URL: http://qrp.ru/forum/9-Самодельная-техника/13465-Трансивер-на-полевых-транзисторах (дата обращения 15.03.2026).

[9] Колосовский Е.А. *Устройства приема и обработки сигналов*. Москва, Горячая линия – Телеком, 2017, 456 с.

[10] Головин О.В. *Радиоприемные устройства*. Москва, Горячая линия – Телеком, 2016, 588 с.

[11] Пушкарев В.П. *Устройства приема и обработки сигналов*. Томск, ТУСУР, 2012, 201 с.

Поступила в редакцию 05.05.2026

Валякин Артем Михайлович — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов», КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация.

Присняк Илья Дмитриевич — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов», КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация.

Научный руководитель — В.В. Кузнецов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и технология производства электронных приборов», КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:
Валякин А.М., Присняк И.Д. Моделирование узлов коротковолновой связной аппаратуры при помощи свободного программного обеспечения. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 5(106). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1125.html

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 ISSN 2541-8009

SIMULATION OF SHORTWAVE COMMUNICATION EQUIPMENT UNITS USING OPEN-SOURCE SOFTWARE

A.M. Valyakin valyakinam@student.bmstu.ru
I.D. Prisn prisnyakid@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russian Federation

This article discusses methods for mathematical modeling of shortwave electronic device components using the QUCS-S (Quite Universal Circuit Simulator) computer-aided design system. This modeling system is based on the Ngspice computational kernel and enables frequency-domain analysis of electronic circuits, including calculation of scattering parameters. The paper describes an approach to modeling electronic devices based on their representation as two-port networks and S-parameter analysis. Simulations were performed to determine the frequency characteristics of key components of an amateur shortwave transceiver, including mixers, band-pass filters, and amplifier stages. Methods for calculating key parameters of high-frequency circuits, such as reflection coefficient and standing wave ratio, are also presented.

Keywords: computer-aided design system, free software, transceiver, mixer, filter, amplifier, mathematical modeling, quadripole, S-parameters, voltage standing wave ratio, quality factor

References

[1] Moshchenskiy Yu.V., Nechaev A.S. *Teoreticheskie osnovy radiotekhniki. Signaly* [Theoretical Foundations of Radio Engineering. Signals]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2021, 216 p. (In Russ.).

[2] Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio Circuits and Signals]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005, 462 p. (In Russ.).

[3] Razevig G.V. *Sistema skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 10* [Micro-Cap 10 Circuit Simulation System]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2012, 512 p. (In Russ.).

[4] Brinson M., Kuznetsov V. Qucs-0.0.19S: A new open-source circuit simulator and its application for hardware design. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Moscow, Russia, 2016, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491696

[5] Vogt H., Hendrix M., Nenzi P. *Ngspice User's Manual Version 42*. 2024. Available at: http://ngspice.sourceforge.net/docs/ngspice-manual.pdf (accessed March 15, 2026).

[6] Kuznetsov V.V., Andreev V.V., Lomakin S.A. Semiconductor Device Compact Simulation Taking Into Account the ESD Effect and Using the Free Circuit Simulation Software. *2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics,*

 © BMSTU, 2026

Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation, 2025, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10970809

[7] Pozar D.M. *Mikrovolnovaya tekhnika* [Microwave Engineering]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2015, 784 p. (In Russ.).

[8] Kuznetsov V. *Transiver na polevykh tranzistorakh* [Field-Effect Transistor Transceiver]. Klub RU-QRP, May 19, 2024. Available at: http://qrp.ru/forum/9-Самодельная-техника/13465-Трансивер-на-полевых-транзисторах (accessed March 15, 2026).

[9] Kolosovskiy E.A. *Ustroystva priema i obrabotki signalov* [Signal Reception and Processing Devices]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2017, 456 p. (In Russ.).

[10] Golovin O.V. *Radiopriemnye ustroystva* [Radio Receivers]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2016, 588 p. (In Russ.).

[11] Pushkarev V.P. *Ustroystva priema i obrabotki signalov* [Signal Reception and Processing Devices]. Tomsk, TUSUR Publ., 2012, 201 p. (In Russ.).

Received 05.05.2026

Valyakin A.M. — Student, Department of Design and Technology of Electronic Device Production, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russian Federation.

Prisnyak I.D. — Student, Department of Design and Technology of Electronic Device Production, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russian Federation.

Scientific advisor — V.V. Kuznetsov, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Technology of Electronic Device Production, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russian Federation.

Please cite this article in English as:
Valyakin A.M., Prisnyak I.D. Simulation of shortwave communication equipment units using open-source software. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 5 (106). (In Russ.). URL: https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/sta/1125.html

© BMSTU, 2026 ISSN 2541-8009