

БИБЛИОТЕКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УСИЛИТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ

Наталья Викторовна Чеко́тун

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, старший преподаватель, кафедра специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383) 361-07-31, e-mail: zarjetskaya@yandex.ru

Сергей Викторович Савелькаев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, кафедра специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383) 361-07-31, e-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

В работе рассмотрены математические модели усилителя, нестабилизированного генератора и автогенератора, учитывающие параметры устойчивости активного компонента. Разработанная библиотека математических моделей обеспечивает автоматизацию имитационного моделирования усилителей и автогенераторов посредством имитатора-анализатора в составе САПР.

Ключевые слова: анализатор СВЧ-цепей, активный компонент, комплексный коэффициент отражения, S -параметры, частота генерации, внешняя обратная связь

LIBRARY OF MATHEMATICAL MODELS OF MICROWAVE AMPLIFIERS AND MICROWAVE GENERATORS

Natalia V. Chekotun

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate Student, Senior Lecturer, phone: (383) 361-07-31, e-mail: zarjetskaya@yandex.ru

Sergei S. Savelkaev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, phone: (383) 361-07-31, e-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

The paper considers mathematical models of an amplifier, an unstabilized generator, and an autogenerator which take into account the stability parameters of the active component. The developed library of mathematical models provides automation of simulation modeling of amplifiers and autogenerators by means of a simulator-analyzer in the CAD system.

Keywords: microwave network analyzer, active component, complex reflectance, S -parameters, generation frequency, external feedback

Введение

Для автоматизации имитационного моделирования усилителей и автогенераторов СВЧ имитатором-анализатором в системе САПР необходимо создать математические модели этих устройств [1–3].

Математическое моделирование усилителей с заданным уровнем выходной мощности

Математическое моделирование усилителя СВЧ в пространстве S -параметров начинают с выбора его активного компонента (АК) [4–7]. АК должен обеспечивать разработку этого усилителя в соответствии с его техническим заданием. Для выбора АК анализируются предельно допустимые значения его эксплуатационных электрических характеристик, известные из паспортных данных. Так например, коэффициент шума $K_{ш}$ выбираемого АК, его максимальная выходная мощность $P_{\text{ВЫХ max}}$ и максимально возможный коэффициент усиления $K_{P\text{max}}$ должны составлять: $K_{ш} = (0,8 - 0,9) K_{ш}^0$, $P_{\text{ВЫХ max}} = (0,1 - 1,2) P_{\text{ВЫХ}}^0$ и $K_{P\text{max}} \geq K_P^0$ от требуемых в техническом задании (ТЗ) значений $K_{ш}^0$, $P_{\text{ВЫХ}}^0$, K_P^0 . Интервал выбираемого АК должен полностью покрывать полосу пропускания Δf^0 усилителя СВЧ, заданную в его ТЗ. После выбора АК необходимо осуществить его математическое моделирование и рассчитать его S -параметры. Сигнальный граф усилителя, имитируемого посредством имитатора-анализатора, показан на рис. 1.

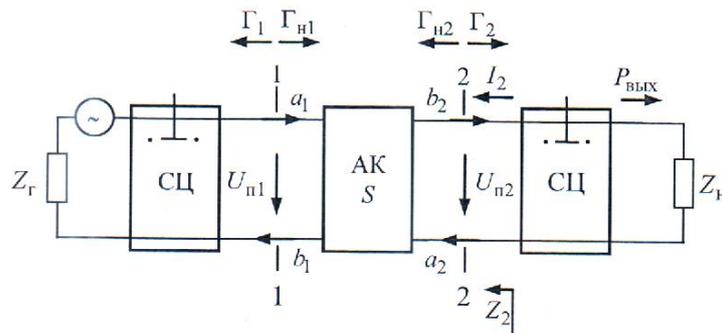


Рис. 1. Структурная схема усилителя

Математическое моделирование усилителя СВЧ с требуемым уровнем $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}}^0$ его выходной мощности зависит от коэффициента устойчивости его АК

[1–3, 9]: $K = \frac{1 + |\Delta_S|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{11}S_{22}|}$, где $\Delta_S = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$ – определитель.

1. В случае безусловной устойчивости АК (рис. 2, а) для параметров устойчивости $K > 1$ и $B_j = 1 + |S_{jj}|^2 - |S_{ii}|^2 - |\Delta_S|^2 > 1$; $i, j = 1, 2$; $i \neq j$ математическое моделирование усилителя проводится в следующем порядке.

1.1. Если нужно получить максимально возможную выходную мощность усилителя $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}}^0 = P_{\text{ВЫХ max}}$, то нагрузочные комплексные коэффициенты отражения его АК:

$$\Gamma_{Hj} = \left(B_j - \sqrt{B_j - 4|C_j|^2} \right) / 2C_j, \quad (1)$$

обеспечивающие двухстороннее комплексно-сопряженное согласование $\Gamma_{Hj} = \Gamma_j^*$,

где $C_j = S_{jj} - \Delta_S S_{ii}^*$; $i, j=1, 2; i \neq j$.

Максимально возможное значение коэффициента усиления $K_P = K_{P_{\max}}$ имитируемого усилителя по мощности в режиме $\Gamma_{Hj} = \Gamma_j^*$ АК, выраженное через коэффициент устойчивости K и его максимальную возможную выходную мощность $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}_{\max}}$, можно рассчитать по формулам [1, 6]:

$$K_P = K_{P_{\max}} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| (K - \sqrt{K^2 - 1}); P_{\text{ВЫХ}_{\max}} = K_{P_{\max}} P_{\text{ВХ}}. \quad (2)$$

Рассчитанные таким образом нагрузочные комплексные коэффициенты отражения (ККО) АК Γ_{Hj} должны принадлежать устойчивым областям $+(\Gamma_{H1}, \Gamma_{H2})$ (рис. 2, а). В этом случае обеспечиваются: максимально возможное значение коэффициента усиления имитируемого усилителя $K_P = K_P^0 = K_{P_{\max}}$, максимально возможное значение входной мощности $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}}^0 = P_{\text{ВЫХ}_{\max}}$, где K_P^0 и $P_{\text{ВЫХ}}^0$ – требуемые номинальные уровни, определенные в техническом задании.

1.2. В случае, когда выходная мощность имитируемого усилителя должна составлять $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}}^0 < P_{\text{ВЫХ}_{\max}}$, расчет реализуемого коэффициента усиления K_P и выходной мощности $P_{\text{ВЫХ}}$ имитируемого усилителя производится по формулам [1, 6]:

$$K_P = |S_{21}|^2 \frac{(1 - |\Gamma_{H1}|^2)(1 - |\Gamma_{H2}|^2)}{|1 - \Gamma_1 \Gamma_{H1}|^2 |1 - S_{22} \Gamma_{H2}|^2} = K_{P0} g, \text{ где } g = \frac{(1 - |\Gamma_{H1}|^2)(1 - |\Gamma_{H2}|^2)}{|1 - S_{11} \Gamma_{H1} - S_{22} \Gamma_{H2} + \Delta_S \Gamma_{H1} \Gamma_{H2}|^2}.$$

Коэффициент g определяет отличие коэффициента усиления имитируемого усилителя K_P от его коэффициента усиления $K_{P0} = |S_{21}|^2$ при $\Gamma_{Hj} = 0$, когда $g = 0$.

В случае преобразования $\Gamma_{Hj} = \Gamma_j^*$ АК коэффициент g может быть представ-

лен в виде: $g_1 = \frac{K_{P0}}{K_{P2}} = \frac{1 - |\Gamma_{H2}|^2}{|1 - S_{11} \Gamma_{H1} - S_{22} \Gamma_{H2} + \Delta_S \Gamma_{H1} \Gamma_{H2}|^2}.$

Раскладывая данное выражения по степеням модуля $|\Gamma_{H2}|$ нагрузочного ККО

Γ_{H2} , получим $|\Gamma_{H2}|^2 - \frac{2g_1 \text{Re}(\Gamma_{H2} C_2)}{1 + g_1 D_2} + \frac{g_1 (1 - |S_{11}|^2) - 1}{1 + g_1 D_2} = 0.$

При $K_P = \text{const}$ это уравнение задает в комплексной плоскости окружность O_{P2}

(рис. 2, а) с центром $r_{P2} = \frac{g_1 C_2^*}{1 + g_1 D_2}$ и радиусом $R_{P2} = \frac{(1 - 2K |S_{12} S_{21}| g_1 + |S_{12} S_{21}|^2 g_1^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + g_1 D_2}$, где

$$D_2 = |S_{22}| - |\Delta_S|^2, g_1 = \frac{K_{P0}}{K_{P2}}.$$

Выбор нагрузочного комплексного коэффициента отражения АК Γ_{Hj} на окружности O_P обеспечивает выполнение условия $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}}^0 < P_{\text{ВЫХ max}}$ для выходной мощности имитируемого усилителя по требуемому номинальному уровню $P_{\text{ВЫХ}}^0$, заданному в техническом задании. При $R_{p2} = 0$:

$$g = \frac{K \pm \sqrt{K^2 - 1}}{|S_{12} S_{21}|}, \quad (3)$$

где выбор знака (\pm) противоположен знаку B_j . В точке, где $R_{p2} = 0$, коэффициент усиления по мощности K_P будет равен его максимальному значению

$$K_P = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |\Gamma_{H1}|^2)(1 - |\Gamma_{H2}|^2)} = K_{P \text{ max}}.$$

Для выбранного значения Γ_{H2} нагрузочного комплексного коэффициента отражения АК определяется нагрузочный ККО Γ_{H1} : $\Gamma_{H1} = \left[\frac{S_{11} - \Delta_S \Gamma_{H2}}{1 - S_{22} \Gamma_{H2}} \right]^*$.

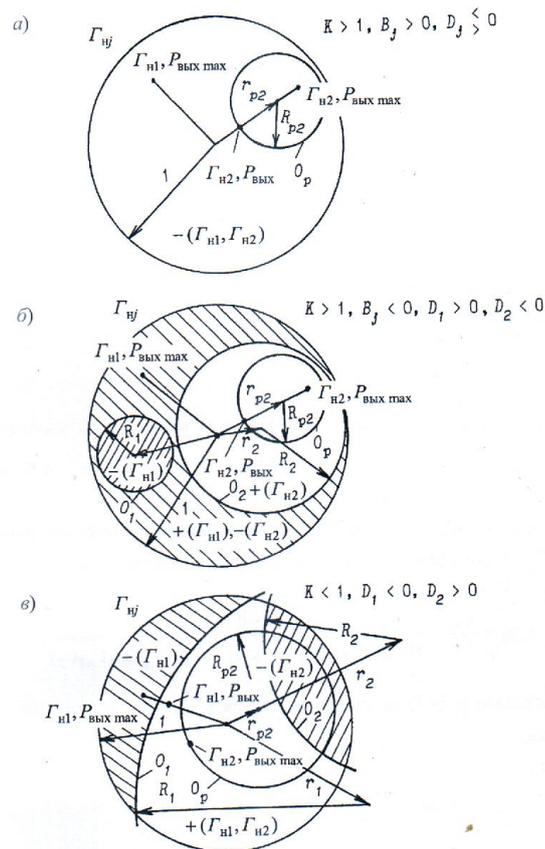


Рис. 2. Диаграммы в комплексной плоскости нагрузочных комплексных коэффициентов отражения Γ_{H1}, Γ_{H2} :

а) безусловно устойчивые АК усилителей; б), в) потенциально устойчивые АК усилителей.

2. В случае потенциальной устойчивости АК (рис. 2, б) для параметров устойчивости принимаются значения $K > 1$, $B_j < 0$, при которых еще возможно двухстороннее комплексно-сопряженное согласование $\Gamma_{Hj} = \Gamma_j^*$.

Математическое моделирование имитируемого имитатором-анализатором усилителя СВЧ осуществляется аналогично тому, как было рассмотрено выше, с заменой знака перед радикалом на «+» в формулах (1) и (2), и в формуле (3) выбирается знак «+». При этом значение нагрузочного комплексного коэффициента отражения Γ_{H2} АК необходимо выбирать из устойчивой области $+(\Gamma_{H2})$ (см. рис. 2, б). После расчета нагрузочного комплексного коэффициента отражения Γ_{H1} необходимо проверить, находится ли он в устойчивой области $+(\Gamma_{H1})$ его комплексной плоскости. Если рассчитанное значение Γ_{H1} попадает в неустойчивую область $-(\Gamma_{H1})$, нужно произвести повторный расчет имитируемого усилителя, выбрав другое значение нагрузочного ККО Γ_{H2} его АК.

3. В случае потенциальной устойчивости АК для параметра $K < 1$ (рис. 2, в), при котором уже невозможно его двухстороннее комплексно-сопряженное согласование $\Gamma_{Hj} = \Gamma_j^*$, математическое моделирование имитируемого усилителя осуществляется в соответствии с подпунктом 1.2. Значение нагрузочного комплексного коэффициента отражения Γ_{H1} выбирается из устойчивой области $+(\Gamma_{H1})$ его комплексной плоскости (см. рис. 2, в). При этом реализуемая выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}}^0 < P_{\text{ВЫХ}_{\text{max}}}$ этого имитируемого усилителя должна быть максимально приближена к ее требуемому уровню $P_{\text{ВЫХ}}^0$, заданному в ТЗ.

Таким образом, разработана математическая модель имитируемого усилителя СВЧ, которая обеспечивает расчет нагрузочных ККО Γ_{Hj} его активного компонента исходя из требуемого номинального уровня $P_{\text{ВЫХ}}^0$ выходной мощности $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}}^0 = P_{\text{ВЫХ}_{\text{max}}}$ или $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}}^0 < P_{\text{ВЫХ}_{\text{max}}}$ этого устройства, заданного в формате его ТЗ.

Математическое моделирование нестабилизированных автогенераторов СВЧ

В настоящее время разработана среда проектирования автогенераторов СВЧ на базе пакета Microwave Office (MWO), позволяющая исследовать автогенератор с помощью метода гармонического баланса, использующего рассчитанные [1–3, 15, 17] или измеренные [6, 8, 9] S -параметры АК автогенератора. В результате будут определены частота генерации f и условия самовозбуждения автогенератора с использованием генераторного зонда.

Недостаток среды на базе пакета MWO состоит в том, что она предполагает наличие исходной электрической схемы автогенератора для ее анализа. Эта схема далеко не всегда является оптимальной с точки зрения обеспечения заданных технических характеристик автогенератора. В пакете MWO отсутствуют критерии выбора и оптимизации электрической схемы.

Авторами ранее подробно рассмотрена методика расчета автогенераторов СВЧ в пространстве S -параметров как без внешней обратной связи (ОС), так и с параллельной или последовательной внешней ОС, охватывающей АК [1, 2, 3, 7, 9, 10, 11, 13, 17]. Эта методика позволяет на основе условия самовозбуждения автогенератора, записанного в комплексной форме, рассчитать нагрузочные ККО АК Γ_{Hj} и параметры внешней ОС, обеспечивающие требуемую частоту f генерации автогенератора и его максимальную выходную мощность $P_{\text{ВЫХ}}$, и приближенно оценить ее значение. Анализ устойчивости АК, а также анализ условий его самовозбуждения обеспечивают выбор оптимальной электрической схемы автогенератора [12, 14–17].

Исходные данные для математического моделирования имитируемого автогенератора: требуемая частота генерации f , относительная нестабильность частоты генерации δ_f , требуемая выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$.

АК выбирается по максимальной частоте генерации f_{max} , максимально допустимой рассеиваемой мощности $P_{\text{ВЫХ}}$ и КПД η , известным из паспортных данных, так, чтобы выполнялись условия: $f = f_{\text{max}}/(1,0 - 1,2)$ и $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ}}(1,0 - 1,2)$.

Если $\delta_f = 10^{-3} - 10^{-4}$, проектирование генератора СВЧ можно выполнить в микрополосковом исполнении. Дополнительная стабилизация частоты генерации f не требуется.

Когда выбраны АК и вариант исполнения автогенератора, моделируются приближенные значения S -параметров (с помощью пакета MWO). Такой подход обусловлен тем, что Γ_{H2} выбранного АК, как правило, неизвестны. Они определяются в процессе имитационного моделирования автогенератора имитатором-анализатором.

Заключение

Таким образом, авторами была разработана библиотека математических моделей: усилителя, нестабилизированного генератора и автогенератора, стабилизированного многослойной диэлектрической структурой (МДС) на основе диэлектрического резонатора, включая методику расчета резонансной частоты f_0 МДС [10–13]. Библиотека обеспечивает автоматизацию имитационного моделирования усилителей и автогенераторов посредством имитатора-анализатора в составе САПР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савелькаев С.В. Теоретические основы построения имитаторов-анализаторов усилителей и автогенераторов СВЧ: Монография. – СПб.: Издательство «Лань», 2019. – 100 с.
2. Савелькаев С.В., Заржецкая Н.В. Расчет и проектирование автогенераторов СВЧ в пространстве S -параметров // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2016. – Вып. 1. – С. 50–61.
3. Савелькаев С.В. Теоретические основы построения двухсигнальных анализаторов СВЧ-цепей // Измерительная техника. – 2005. – № 3. – С. 41–46.

4. Савелькаев С.В. Методы анализа устойчивости активных СВЧ-цепей и измерения их S -параметров // Метрология, 2005. – № 4. – С. 19–28.
5. Савелькаев С.В. Коаксиальное контактное устройство // Измерительная техника. – 2005. – №5. – С. 65–68.
6. Савелькаев С.В., Устюгов М.Б. К вопросу повышения эффективности систем автоматизированного проектирования усилительных и автогенераторных СВЧ-устройств // Вестн. СГГА. – 2004. – Вып. 9. – С. 128–130.
7. Савелькаев С.В., Айрапетян В.С., Литовченко В.А. Методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S -параметров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014: X Междунар. науч. конгр., 8–18 апр. 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014»: сб. материалов в 2 т. – Новосибирск: СГГА, 2014. – Т. 2. – С. 164–171.
8. Савелькаев С.В., Устюгов М.Б., Григорьева Г.В. Трехсекционная дрейфово-диффузионная математическая модель полевого транзистора с барьером Шоттки // Сб. матер. V Международного научного конгресса «ГЕО-СИБИРЬ-2009». – Новосибирск: СГГА, 2009. – Т. 5, ч. 2. – С. 74–79.
9. Савелькаев С.В. Теоретические основы построения имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ [Текст] / С.В. Савелькаев, С.В. Ромасько, В.А. Литовченко, Н.В. Заржецкая // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2017. – Вып. 1. – С. 63–74.
10. Савелькаев С.В. Теоретические основы построения имитатора-анализатора активных СВЧ-цепей [Текст] / С.В. Савелькаев, С.В. Ромасько, В.А. Литовченко, Н.В. Заржецкая // Успехи современной радиотехники. – 2017. – № 2. – С. 50–61.
11. Савелькаев С.В. Аналитический обзор двухсигнальных методов измерения S -параметров четырехполюсников [Текст] / С.В. Савелькаев, В.А. Литовченко, Н.В. Заржецкая // Автометрия. – 2019. – № 6. – С. 31–43.
12. Савелькаев С.В. Методика измерения комплексных параметров отражения нагрузок транзистора на имитаторе-анализаторе усилителей и автогенераторов СВЧ [Текст] / С.В. Савелькаев, В.А. Литовченко, Н.В. Заржецкая // Автометрия. – 2019.
13. Савелькаев С.В. Теоретические основы построения имитаторов-анализаторов для систем автоматического проектирования усилителей и автогенераторов СВЧ [Текст]: препринт / С.В. Савелькаев, В.А. Литовченко, Н.В. Заржецкая, С.В. Ромасько; под общ. ред. С.В. Савелькаева. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – 127 с.
14. Савелькаев С.В. Теоретические основы построения имитатора-анализатора активных СВЧ-цепей S -параметров / С.В. Савелькаев, С.В. Ромасько, В.А. Литовченко, Н.В. Заржецкая // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 175–188.
15. Н.В. Заржецкая, В.А. Литовченко. Обзор методов измерения S -параметров транзисторов СВЧ в режиме большого сигнала [Текст] // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Вып. 4 (48). – С. 306–327.
16. Заржецкая Н.В., Литовченко В.А. Коаксиальное контактное устройство и способ его калибровки [Текст] // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019. XV Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2019»: сб. материалов в 10 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2019 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. – Т. 9. – С. 77–86.
17. Савелькаев С.В. Метод анализа устойчивости активных СВЧ-цепей / С.В. Савелькаев, В.А. Литовченко, С.В. Ромасько, Н.В. Заржецкая // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2016 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – Т. 5. – С. 224–228.

© Н. В. Чеботун, С. В. Савелькаев, 2021