



УДК 621.372.413

С. В. Савелькаев, Н. В. Заржецкая
Сибирский государственный университет
геосистем и технологий (Новосибирск)

Расчет и проектирование автогенераторных СВЧ-устройств в пространстве S-параметров

Рассмотрена методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S-параметров как без внешней обратной связи, так и с параллельной или последовательной внешней обратной связью активного компонента (АК). Методика позволяет на основе условия самовозбуждения автогенератора, записанного в комплексной форме, рассчитать комплексные коэффициенты отражения нагрузок АК и параметры внешней обратной связи, обеспечивающие требуемую частоту генерации автогенератора и максимальную выходную мощность, а также приближенно оценку значения этой мощности. Анализ устойчивости АК и условий его самовозбуждения обеспечивает выбор оптимальной электрической схемы автогенератора, а рассчитанные комплексные коэффициенты отражения нагрузок АК и параметры внешней обратной связи обеспечивают синтез топологии рассмотренного автогенератора.

Автогенератор СВЧ, S-параметры и комплексные коэффициенты отражения нагрузок, обратная связь, условие самовозбуждения, частота генерации, выходная мощность, электрическая схема, топология

В настоящее время разработана среда проектирования автогенераторов СВЧ на базе пакета Microwave Office (MWO) [1], позволяющая проанализировать автогенератор методом гармонического баланса с использованием рассчитанных или измеренных S-параметров активного компонента (АК). В результате могут быть определены частота автогенерации и условия самовозбуждения генератора с использованием генераторного зонда, а также решены многие другие задачи.

Недостатком среды на базе пакета MWO является то, что она предполагает наличие исходной электрической схемы автогенератора, подвергаемой анализу. Однако эта электрическая схема может оказаться неоптимальной для обеспечения заданных технических характеристик автогенератора. Критерии выбора и оптимизации схемы в пакете MWO отсутствуют.

В настоящей статье предложена методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S-параметров как без внешней обратной связи (ОС), так и с параллельной или последовательной внешней ОС, охватывающей АК [2]. Эта методика позволяет на основе условия самовозбуждения автогенератора, записанного в комплексной форме, рассчитать комплексные коэффициенты отражения (ККО) нагрузок АК и параметры внешней ОС, обеспечивающие требуемую частоту генерации

автогенератора и его максимальную выходную мощность, а также приближенно оценить значение этой мощности. Анализ устойчивости АК и условий его самовозбуждения обеспечивает выбор оптимальной электрической схемы автогенератора, а рассчитанные ККО нагрузок АК и параметры внешней ОС обеспечивают последующий синтез топологии этого автогенератора на базе пакета MWO.

Математическое моделирование автогенератора СВЧ. Исходными данными для математического моделирования автогенератора являются требуемая частота генерации f , ее относительная нестабильность δ_f и требуемая выходная мощность $P_{\text{вых}}$.

АК выбирается по максимальной частоте генерации f_{max} , максимально допустимой рассеиваемой мощности $P_{\text{вых max}}$ и коэффициенту полезного действия (КПД) η , известным из паспортных данных компонента, так, чтобы выполнялись условия $f = f_{\text{max}} / (1.0 \dots 1.2)$ и $P_{\text{вых}} = P_{\text{max}} / (1.0 \dots 1.2)$. Если требуемая относительная нестабильность составляет $\delta_f = 10^{-3} \dots 10^{-4}$, автогенератор можно спроектировать в микрополосковом исполнении без дополнительных мер стабилизации частоты генерации f .

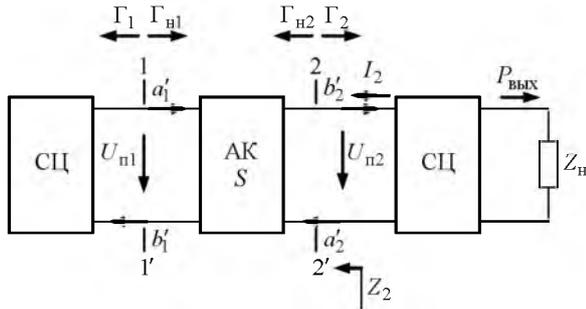


Рис. 1

Структурная схема моделируемого автогенератора представлена на рис. 1, где СЦ – согласующие цепи, а АК характеризуется матрицей S -параметров $S = \{S_{kl}\}$, $k, l = 1, 2$.

Методика расчета автогенератора зависит от коэффициента устойчивости АК [2], [3]:

$$K = \frac{1 + |\Delta_S|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{11}S_{22}|}, \quad (1)$$

где

$$\Delta_S = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} \quad (2)$$

– определитель матрицы S -параметров АК, которые должны быть измерены в реальном рабочем режиме эксплуатации [4], [5].

Потенциальная устойчивость АК. Данный режим характеризуется значениями $K < 1$ (1). При этом расчет автогенератора можно осуществить без применения внешней ОС. Условие самовозбуждения АК имеет вид

$$\Gamma_2 \Gamma_{н2} = 1, \quad (3)$$

где Γ_2 – ККО в плоскости 2–2' на выходе АК; $\Gamma_{н2}$, $\Gamma_{н1}$ – ККО нагрузок (нагрузочные ККО) на выходе АК в плоскости 2–2' и на его входе в плоскости 1–1' соответственно (рис. 1).

ККО Γ_2 определяется по правилу некасающихся контуров при представлении автогенератора (рис. 1) ориентированным сигнальным графом:

$$\Gamma_2 = b_2/a_2 = (S_{22} - \Delta_S \Gamma_{н1}) / (1 - S_{11} \Gamma_{н1}). \quad (4)$$

Соотношения (3) и (4) устанавливают связь нагрузочных ККО АК $\Gamma_{н1}$, $\Gamma_{н2}$ через его S -параметры и эквивалентно классическим условиям баланса амплитуд и баланса фаз, записанным в комплексной форме. Действительно, (3) можно записать в виде

$$|\Gamma_2| |\Gamma_{н2}| e^{i(\varphi_2 + \varphi_{н2})} = 1, \quad (5)$$

где $|\Gamma_2|$ и $|\Gamma_{н2}|$ – модули ККО Γ_2 и $\Gamma_{н2}$ соответственно; φ_2 и $\varphi_{н2}$ – фазы ККО Γ_2 и $\Gamma_{н2}$ соответственно.

Условие (5) выполняется при балансе амплитуд

$$|\Gamma_2| |\Gamma_{н2}| = 1 \quad (6)$$

и балансе фаз

$$\varphi_2 + \varphi_{н2} = 2\pi n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

приведенных к классическому виду. Причем (6) должно выполняться при соотношениях

$$|\Gamma_2| > 1 \text{ и } |\Gamma_{н2}| < 1, \quad (7)$$

учитывающих действительное отрицательное сопротивление $\text{Re} Z_2 = Z_0 (1 + |\Gamma_2|) / (1 - |\Gamma_2|)$ в плоскости 2–2' на выходе АК, где Z_0 – волновое сопротивление линии, в которой были измерены S -параметры этого компонента. Максимальное значение модуля ККО (7)

$$|\Gamma_2| = |\Gamma_2|_{\max} \quad (8)$$

соответствует максимальному значению выходной мощности $P_{\text{вых}} = P_{\text{вых max}}$ автогенератора, отдаваемой в нагрузку с сопротивлением Z_n (рис. 1).

Согласно (3) условие согласования сопротивления Z_2 с сопротивлением нагрузки Z_n имеет вид

$$\Gamma_{н2} = \Gamma_2^{-1}. \quad (9)$$

Для расчета нагрузочного ККО $\Gamma_{н1}$ представим (4) в виде дробно-линейного конформного преобразования

$$\Gamma_2^{-1} = (a\Gamma_{н1} + b) / (c\Gamma_{н1} + d), \quad (10)$$

отображающего значения ККО $\Gamma_{н1}$ из его комплексной плоскости на комплексную плоскость ККО Γ_2^{-1} (рис. 2). На этом рисунке окружность O_1 единичного радиуса соответствует условию $|\Gamma_2| = 1$, а допустимые значения Γ_2^{-1} лежат внутри этой окружности. Окружность O_2 определяет значения Γ_2^{-1} , при которых выполняется условие самовозбуждения АК (3).

Параметры $a = -S_{11}$, $b = 1$, $c = -\Delta_S$ и $d = S_{22}$ дробно-линейного преобразования (10) позволяют рассчитать полярный радиус r_2 , определяющий положение центра O окружности O_2 в систе-

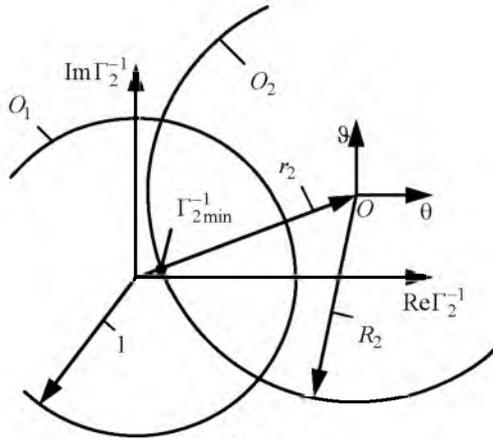


Рис. 2

ме координат $\text{Re}\Gamma_2^{-1}$, $\text{Im}\Gamma_2^{-1}$ окружности O_1 , и радиус R_2 окружности O_2 в ее собственной системе координат $O\theta\vartheta$ для фиксированного значения модуля $|\Gamma_{н1}|$ нагрузочного ККО:

$$r_2 = \frac{bd^* - ac^* |\Gamma_{н1}|^2}{|d|^2 - |c|^2 |\Gamma_{н1}|^2} = \frac{S_{22}^* - \Delta_S^* S_{11} |\Gamma_{н1}|^2}{D_2}, \quad (11)$$

где

$$D_2 = |S_{22}|^2 - |\Delta_S|^2 |\Gamma_{н1}|^2; \quad (12)$$

"*" – обозначение комплексного сопряжения;

$$R_2 = \frac{|ad - bc| |\Gamma_{н1}|}{|d|^2 - |c|^2 |\Gamma_{н1}|^2} = \frac{|S_{12} S_{21}| |\Gamma_{н1}|}{|D_2|}.$$

Анализируя условия физической реализуемости автогенератора, можно показать, что модуль нагрузочного ККО $|\Gamma_{н1}|$, входящий в (11) и (12), должен быть равен 1, поскольку его меньшие значения $|\Gamma_{н1}| < 1$ приводят к рассеянию мощности $P_1 = |b_1|^2 / 2$, поступающей во входную СЦ, и, следовательно, к снижению КПД (η_a) моделируемого автогенератора в целом.

Максимальное значение модуля $|\Gamma_2|_{\max}$ (8) (рис. 2) определяется через минимум обратной величины:

$$\Gamma_2^{-1} \min = \pm r_2 (1 - R_2 / r_2), \quad (13)$$

где знак "+" берется при $D_2 > 0$, а знак "-" – при $D_2 < 0$. Для этого определения полярный радиус r_2 и радиус R_2 рассчитываются из (11) при $|\Gamma_{н1}| = 1$.

Подстановка (13) в (4) позволяет для нагрузочного ККО записать:

$$\Gamma_{н1} = \frac{S_{22} \pm r_2 (1 - R_2 / r_2)}{\Delta_S \pm S_{11} r_2 (1 - R_2 / r_2)}, \quad (14)$$

при его фазе $\varphi_{н1}$, обеспечивающей максимальное значение ККО (8). Соответствующее ему значение нагрузочного ККО $\Gamma_{н2}$ определяется из (9) и (4).

Для ориентировочной оценки выходной мощности ($P_{\text{вых}}$) автогенератора и его КПД (η_a), не соответствующих стационарному режиму работы, определим из структурной схемы (см. рис. 1) внутренний коэффициент усиления и коэффициент ОС АК:

$$K_y = b_2 / b_1 = S_{21} \Gamma_1 / (1 - S_{22} \Gamma_{н2}); \quad (15)$$

$$K_{\text{ОС}} = b_1 / b_2 = S_{12} \Gamma_{н2} / (1 - S_{11} \Gamma_1).$$

С учетом (15) классическое условие баланса амплитуд, которому эквивалентно условие (6), имеет вид

$$K_y K_{\text{ОС}} = 1. \quad (16)$$

Учитывая, что мощности во входной и выходной плоскостях АК определяются как

$$P_i = (|a_k|^2 - |b_k|^2) / 2, \quad k = 1, 2,$$

запишем:

$$\eta = (P_1 + P_2) / P_{\Pi}; \quad P_2 = P_1 |K_y|^2 (1 - |K_{\text{ОС}}|^2), \quad (17)$$

где $P_{\Pi} = I_2 U_{\Pi 2}$ – мощность, потребляемая АК от источника питания (I_2 и $U_{\Pi 2}$ – ток стока и напряжение "сток-исток" АК соответственно) (см. рис. 1).

Совместное решение (16) и (17) позволяет определить мощность в плоскости 2 – 2' на выходе АК:

$$P_2 = P_{\Pi} \eta (1 - |K_y|^{-2}) = P_{\Pi} \eta (1 - |K_{\text{ОС}}|^2). \quad (18)$$

С учетом (18) выходную мощность моделируемого автогенератора, отдаваемую в нагрузку с сопротивлением в плоскости $Z_{н}$, оценим как

$$P_{\text{вых}} = P_2 |\hat{S}_{21}|^2, \quad (19)$$

где $|\hat{S}_{21}|^2$ – коэффициент передачи выходной СЦ.

Пренебрегая малыми потерями в выходной СЦ с учетом того, что для такого случая $|\hat{S}_{21}|^2 = 1 - |\Gamma_{н2}|^2$, из (18) и (19) получим

$$P_{\text{вых}} = P_{\Pi} \eta_a, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} \eta_a &= \eta(1 - |K_y|^{-2}) |\hat{S}_{21}|^2 = \\ &= \eta(1 - |K_y|^{-2})(1 - |\Gamma_{H2}|^2) = \\ &= \eta(1 - |K_{OC}|^2) |\hat{S}_{21}|^2 = \\ &= \eta(1 - |K_{OC}|^2)(1 - |\Gamma_{H2}|^2). \end{aligned}$$

Определим на комплексной плоскости нагрузочного ККО Γ_{H2} полярные радиусы r_{P2} и радиусы R_{P2} окружностей O_P постоянной выходной мощности ($P_{\text{вых}} = \text{const}$) автогенератора. Для этого сведем (15), (16) и (18) к уравнению вида

$$(\text{Re} \Gamma_{H2} - \text{Re} r_{P2}) + (\text{Im} \Gamma_{H2} - \text{Im} r_{P2})^2 = R_{P2}^2,$$

где

$$\begin{aligned} r_{P2} &= S_{11}/\Delta_S; \\ R_{P2} &= \\ &= \sqrt{\frac{|S_{11}|^2 |S_{21}|^2 (|\Delta_S|^2 - 1)(P_{II}\eta - P_2) - |\Delta_S|^2 P_{II}P_2}{|\Delta_S|^2 |S_{21}|(P_{II}\eta - P_2)}}. \end{aligned}$$

Безусловная устойчивость АК. Режим характеризуется значениями $K > 1$ (1). Для выполнения условия самовозбуждения АК (3) требуется внешняя параллельная (рис. 3, а) или последовательная (рис. 3, б) ОС.

S-параметры АК с внешней ОС определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} S_{11Y} &= \frac{S_\sigma Y + 2S_{11}}{(2 + S_q)Y + 2}; S_{12Y} = \frac{S_c Y + 2S_{12}}{(2 + S_q)Y + 2}; \\ S_{21Y} &= \frac{S_c Y + 2S_{21}}{(2 + S_q)Y + 2}; S_{22Y} = \frac{S_\sigma Y + 2S_{22}}{(2 + S_q)Y + 2} \end{aligned} \quad (21)$$

– при параллельной ОС;

$$\begin{aligned} S_{11Z} &= \frac{S_{11} - 2S_\sigma Z}{(2 + S_f)Z + 2}; S_{12Z} = \frac{S_d Z + 2S_{12}}{(2 + S_f)Z + 2}; \\ S_{21Z} &= \frac{S_d Z + 2S_{21}}{(2 + S_f)Z + 2}; S_{22Z} = \frac{S_{22} + 2S_\sigma Z}{(2 + S_f)Z + 2} \end{aligned} \quad (22)$$

– при последовательной ОС, где Y и Z – нормированные проводимость и сопротивление цепей внешней параллельной и последовательной ОС соответственно;

$$\begin{aligned} S_\sigma &= -1 + \Delta_S + S_{12} + S_{21}; \\ S_q &= S_{11} + S_{22} - S_{12} - S_{21}; S_c = 1 + \Delta_S + S_{11} + S_{22}; \\ S_f &= S_{11} + S_{12} + S_{21} + S_{22}; S_d = 1 + \Delta_S - S_{12} + S_{21} \end{aligned}$$

– S-параметры.

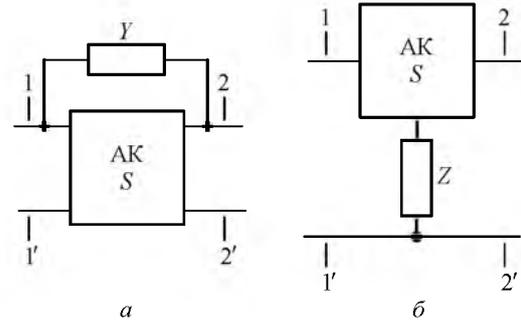


Рис. 3

Значение проводимости Y или сопротивления Z внешней ОС должно быть выбрано так, чтобы ее введение привело к потенциальной устойчивости АК (1):

$$K = \frac{1 + |\Delta_{S\xi}|^2 - |S_{12\xi}|^2 - |S_{22\xi}|}{2|S_{12\xi}S_{21\xi}|} < 1, \quad \xi \in Z, Y,$$

где $\Delta_{S\xi}$ – определители (2) S_ξ -матриц АК (21), (22) при параллельной ($\xi \in Y$) и последовательной ($\xi \in Z$) ОС (рис. 3) соответственно.

Введение ОС значительно усложняет расчет автогенератора, так как в этом случае необходимо искать максимум модуля ККО Γ_2 (3) в зависимости от нагрузочного ККО АК Γ_{H1} , а также значения проводимости Y или сопротивления Z цепи ОС, при которых для этого модуля с учетом условия $|\Gamma_2| > 1$ выполняется соотношение

$$|\Gamma_2| = |\Gamma_2|_{\text{max}} > 1. \quad (23)$$

Для определения значения нагрузочного ККО Γ_{H1} , а также значений проводимости Y и сопротивления Z ОС, при которых выполняется условие (23), подставим в (4) S-параметры (21) и (22) и получим:

$$\Gamma_2 = R[(A - \xi)(B - \xi)] / [(C - \xi)(D - \xi)], \quad (24)$$

где A, B – параметры, определяющиеся формулами

$$A = -Q_1 + \sqrt{Q_1^2 - q_1}; \quad B = -Q_1 - \sqrt{Q_1^2 - q_1}.$$

Параметры R, D, C определяются как

$$\begin{aligned} R &= \frac{S_\sigma + (S_\sigma + S_c)\Gamma_{H1}}{2 + S_q - S_\sigma - \Gamma_{H1}}; \\ D &= \frac{2(S_{11}\Gamma_{H1} - 1)}{2 + S_q - S_\sigma\Gamma_{H1}}; \quad C = -\frac{2}{2 + S_q} \end{aligned} \quad (25)$$

– при параллельной ОС, причем

$$Q_1 = \{S_{22}(2 + S_q) + S_\sigma + [S_c(S_{12} + S_{21}) - S_\sigma(S_{11} + S_{22})]\Gamma_{H1}\} / (2 + S_q)[S_\sigma + (S_\sigma + S_c)\Gamma_{H1}];$$

$$q_1 = 4(\Delta_S \Gamma_{\text{нл}} - S_{22}) / (2 + S_q) [S_\sigma + (S_\sigma + S_c) \Gamma_{\text{нл}}];$$

$$R = \frac{(S_d + S_\sigma) \Gamma_{\text{нл}} - S_\sigma}{2 - S_f - S_\sigma - \Gamma_{\text{нл}}}; \quad (26)$$

$$D = \frac{q_1}{2}; \quad C = -\frac{2}{2 - S_f},$$

– при последовательной ОС, причем

$$Q_1 = \{S_{22}(2 + S_f) - S_\sigma + [S_d(S_{12} + S_{21}) + S_\sigma(S_{11} + S_{22})] \Gamma_{\text{нл}}\} / (2 - S_f) [(S_d + S_\sigma) \Gamma_{\text{нл}} - S_\sigma];$$

$$q_1 = 4(S_{11} \Gamma_{\text{нл}} - 1) / (2 - S_f + S_\sigma \Gamma_{\text{нл}}).$$

Для удобства дальнейшего анализа запишем уравнение (24) в виде

$$|\Gamma_2|^2 = |R|^2 \left| \frac{A - \xi}{C - \xi} \right|^2 \left| \frac{B - \xi}{D - \xi} \right|^2. \quad (27)$$

Для определения максимума модуля параметра R (25), (26) представим этот параметр в виде дробно-линейного конформного преобразования аналогично (10):

$$R^{-1} = (a\Gamma_{\text{нл}} + b) / (c\Gamma_{\text{нл}} + d),$$

отображающего значения нагрузочного ККО $\Gamma_{\text{нл}}$ из его комплексной плоскости на комплексную плоскость параметра R^{-1} , где параметры:

$$a = -S_\sigma; \quad b = 2 + S_q; \quad c = S_\sigma + S_c; \quad d = S_\sigma$$

– при параллельной ОС;

$$a = S_\sigma; \quad b = 2 - S_f; \quad c = S_d + S_\sigma; \quad d = -S_\sigma$$

– при последовательной ОС.

На основании приведенных выражений определяются полярный радиус центра r_2 и радиус R_2 окружности устойчивости АК при $|\Gamma_{\text{нл}}| = 1$ (см. рис. 2):

$$r_2 = \left[(2 + S_q) S_\sigma^* + (S_\sigma + S_c) S_\sigma \right] / D;$$

$$R_2 = \left| S_\sigma^2 + (2 + S_q)(S_\sigma + S_c) \right| / |D|,$$

– при параллельной ОС, причем $D = |S_\sigma|^2 - |S_\sigma + S_c|^2$;

$$r_2 = \left[(S_f - 2) S_\sigma^* - (S_\sigma + S_d) S_\sigma \right] / D;$$

$$R_2 = \left| S_\sigma^2 + (2 - S_f)(S_\sigma + S_d) \right| / |D|,$$

– при последовательной ОС, причем $D = |S_\sigma|^2 - |S_\sigma + S_d|^2$.

Значение нагрузочного ККО $\Gamma_{\text{нл}}$ по его фазе $\varphi_{\text{нл}}$, для которой значение модуля параметра R (25), (26) максимально ($|R| = |R|_{\text{max}}$), можно определить из (14) при замене $S \rightarrow S_\xi$.

Для определения максимума произведения

$$\left| \frac{A - \xi}{C - \xi} \right|^2 \left| \frac{B - \xi}{D - \xi} \right|^2$$

из уравнения (27) подставим его в (4) и получим

$$\left| \frac{A - \xi}{C - \xi} \right|^2 \left| \frac{B - \xi}{D - \xi} \right|^2 \geq |R|^{-2}. \quad (28)$$

Неравенство (28) разложим на систему неравенств

$$\left| \frac{1 - C_{2k} \xi}{1 - C_{3k} \xi} \right|^2 \geq \tilde{P}_k, \quad k = 1, 2, \quad (29)$$

где $C_{21} = 1/A$; $C_{22} = 1/B$; $C_{31} = 1/C$; $C_{32} = 1/D$; $\tilde{P}_1 = 1/|RC_{11}|$; $\tilde{P}_2 = 1/|RC_{12}|$, причем $C_{11} = A/C$; $C_{12} = B/D$.

Для решения системы неравенств (29) сведем ее к системе уравнений вида

$$x^2 + y^2 + u_k x + v_k y + c_k = 0; \quad k = 1, 2, \quad (30)$$

где

$$x = \text{Re } \xi = |\xi| \cos \varphi_\xi; \quad y = \text{Im } \xi = |\xi| \sin \varphi_\xi;$$

$$u_k = a_{k2}/a_{k1}; \quad v_k = a_{k3}/a_{k1}; \quad c_k = -a_{k4}/a_{k1},$$

причем

$$a_{k2} = 2(\tilde{P}_k |C_{3k}| \cos \varphi_{3k} - |C_{2k}| \cos \varphi_{2k});$$

$$a_{k1} = |c_{2k}|^2 - \tilde{P}_k |C_{3k}|^2;$$

$$a_{k3} = 2(|C_{2k}| \sin \varphi_{2k} - \tilde{P}_k |C_{3k}| \sin \varphi_{3k});$$

$$a_{k4} = \tilde{P}_k - 1.$$

Каждое из уравнений (30) есть уравнение окружности O_k на комплексной плоскости обобщенной переменной ξ (рис. 4) с радиусом

$$R_k = \sqrt{a_{k2}^2 + a_{k3}^2 + 4a_{k1}a_{k4}} / (2a_{k1})$$

и полярным радиусом центра r_k длиной

$$|r_k| = \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}$$

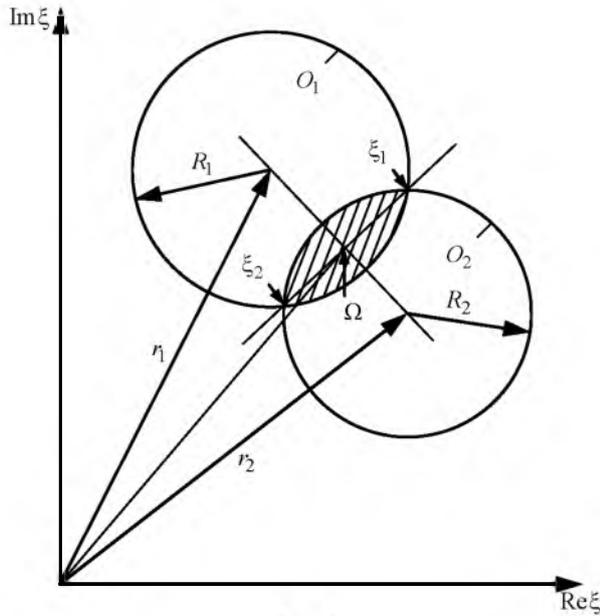


Рис. 4

с фазовым углом $\varphi_k = \arctg(\beta_k/\alpha_k)$, где

$$\alpha_k = -a_{k2}/(2a_{k1}); \beta_k = -a_{k3}/(2a_{k1})$$

– реальная и мнимая координаты центра окружностей O_k .

Область пересечения окружностей O_k определяет область допустимых значений обобщенной переменной ξ , для которых $|\Gamma_{H2}| > 1$. Если окружности O_k не пересекаются, реализация автогенератора для выбранного АК невозможна.

Для решения системы уравнений (30) выразим их через обобщенную переменную ξ :

$$|\xi|^2 + |\xi|F_k - c_k = 0; \quad k = 1, 2, \quad (31)$$

где $F_k = u_k \cos \varphi_\xi + v_k \sin \varphi_\xi$.

Решения уравнений системы (31) имеют вид

$$|\xi_\mu| = (-F_k \pm \sqrt{F_k^2 + 4c_k}/2), \quad \mu = 1, 2, \quad (32)$$

где ξ_μ – полярный радиус μ -й точки пересечения окружностей O_k (рис. 4).

Приравняв решения (32) при $\mu = 1, 2$, получим

$$A_1 \cos^2 \varphi_\xi + A_2 \sin^2 \varphi_\xi + A_3 \cos \varphi_\xi \sin \varphi_\xi + A_4 = 0, \quad (33)$$

где

$$A_1 = (u_1 - u_2)(u_1 c_2 - u_2 c_1);$$

$$A_2 = (v_1 - v_2)(v_1 c_2 - v_2 c_1);$$

$$A_3 = u_1 c_2 (v_1 - v_2) - v_2 c_1 (u_1 - u_2) - u_2 v_1 (c_1 + c_2);$$

$$A_4 = -(c_1 - c_2)^2.$$

Введя переменные $\varsigma = \cos \varphi_\xi$ и $\zeta = \sin \varphi_\xi$, связанные между собой соотношением $\varsigma^2 + \zeta^2 = 1$, сведем (33) к виду

$$E_1 \varsigma^4 + E_2 \varsigma^2 + E_3 = 0, \quad (34)$$

где

$$E_1 = (A_1 - A_2)^2 + A_3^2;$$

$$E_2 = (A_1 - A_2)(A_2 + A_4) - A_3^2; \quad E_3 = (A_2 + A_4)^2.$$

В общем случае решение биквадратного уравнения (34) можно записать в виде

$$\varsigma_{1, 2, 3, 4} = \pm \sqrt{z_{1, 2}},$$

где $z_{1, 2} = (-E_2 \pm \sqrt{E_2^2 - 4E_1 E_3}) / (2E_1)$.

С учетом этого решения, а также определения $\varsigma = \cos \varphi_\xi$, фазу φ_{ξ_μ} μ -й точки пересечения окружностей O_k (рис. 4) в зависимости от квадранта, в котором находится эта точка, определим следующим образом:

$$\varphi_{\xi_{1, 2}} = \arccos \sqrt{z_{1, 2}}$$

– точка располагается в первом квадранте;

$$\varphi_{\xi_{1, 2}} = \pi - \arccos \sqrt{z_{1, 2}}$$

– во втором квадранте;

$$\varphi_{\xi_{1, 2}} = -\arccos \sqrt{z_{1, 2}}$$

– в третьем квадранте;

$$\varphi_{\xi_{1, 2}} = \arccos \sqrt{z_{1, 2}} - \pi$$

– в четвертом квадранте.

Обобщенный параметр генератора – точка Ω пересечения двух прямых, одна из которых проходит через центры окружностей O_k , а другая – через точки пересечения этих окружностей, – характеризуется полярным радиусом ξ_Ω с модулем

$$|\xi_\Omega| = \sqrt{\alpha_\Omega^2 + \beta_\Omega^2} \quad (35)$$

и фазовым углом $\varphi_{\xi_\Omega} = \arctg(\beta_\Omega/\alpha_\Omega)$, где

$$\alpha_\Omega = \text{Re } \xi_\Omega = (B_1 C_2 - B_2 C_1) / (A_1 B_2 - A_2 B_1);$$

$$\beta_\Omega = \text{Im } \xi_\Omega = (C_1 A_2 - C_2 A_1) / (A_1 B_2 - A_2 B_1)$$

– реальная и мнимая координаты точки Ω , причем

$$B_1 = \alpha_2 - \alpha_1;$$

$$C_2 = |\xi_1| \cos \varphi_{\xi 1} - (|\xi_2| \sin \varphi_{\xi 2} - |\xi_1| \sin \varphi_{\xi 1}) +$$

$$+ |\xi_1| \sin \varphi_{\xi 1} (|\xi_1| \cos \varphi_{\xi 1} - |\xi_2| \cos \varphi_{\xi 2});$$

$$B_2 = |\xi_2| \cos \varphi_{\xi 2} - |\xi_1| \cos \varphi_{\xi 1};$$

$$C_1 = \alpha_1 (\beta_2 - \beta_1) + \beta_1 (a_1 - a_2); \quad A_1 = \beta_1 - \beta_2;$$

$$A_2 = |\xi_1| \sin \varphi_{\xi 1} - |\xi_2| \sin \varphi_{\xi 2}.$$

Для рассчитанных по (14) нагрузочного ККО $\Gamma_{н1}$ и по (35) обобщенного параметра ξ_{Ω} модуль ККО АК $|\Gamma_2|$ (24) будет удовлетворять условию максимума $|\Gamma_2|_{\max} > 1$ (23). Соответствующее ему значение выходной мощности $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ max}}$ можно оценить по формуле (20).

Практическое применение методики.

1. *Расчет нагрузочных ККО и СЦ.* Требуется рассчитать автогенератор с частотой генерации $f = 1.36$ ГГц, ее нестабильностью $\delta_f = 10^{-3} \dots 10^{-4}$ и выходной мощностью $P_{\text{ВЫХ}} \geq 40$ мВт.

Для реализации автогенератора с такими техническими характеристиками в качестве АК выбран полевой транзистор с барьером Шотки (ПТБШ) типа 3П602А-2. Его *S*-параметры, измеренные при напряжениях затвора $U_3 = -2.5$ В и стока $U_c = 6.5$ В на частоте $f = 1.36$ ГГц, приведены в табл. 1. Модули *S*-параметров нормированы относительно микрополосковой линии (МПЛ) с волновым сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом.

Таблица 1

Параметр	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}
Модуль	0.982	0.007	3.733	1.204
Фаза, ...°	-29.965	99.617	155.001	-10.956

Так как коэффициент устойчивости (1) ПТБШ 3П602А-2 составляет $K = -0.018$, то возможна реализация автогенератора без внешней ОС АК.

Расчет автогенератора выполнен в микрополосковом исполнении. В качестве основных элементов СЦ ПТБШ использованы разомкнутая и коротко-

замкнутая МПЛ, причем в качестве аналога выходной СЦ использована модель узкополосного согласующего трансформатора с емкостным шлейфом.

Требуемые нагрузочные ККО $\Gamma_{нj}$, обеспечивающие частоту генерации $f = 1.36$ ГГц и выходную мощность автогенератора $P_{\text{ВЫХ}} \geq 40$ мВт, рассчитаны по (4), (9) и (14), а оценка $P_{\text{ВЫХ}}$ автогенератора – по (20).

Результаты расчета автогенератора в пакете MWO [1] приведены в табл. 2, где l_j, w_j – длина и ширина полоска соответственно; Z_j – волновое сопротивление; $\lambda_{\text{э}j}$ – эффективная длина волны в МПЛ; $j = \overline{1, 4}$.

Таблица 2

Частота генерации (f), ГГц		1.36		
Материал подложки		Поликор, $\epsilon = 9.7, h = 1.0$ мм		
ККО входной СЦ $\Gamma_{н1}$		$1 \cdot e^{-j102.6^\circ}$		
ККО выходной СЦ $\Gamma_{н2}$		$0.838 \cdot e^{-j10.507^\circ}$		
Параметры шлейфов				
j	l_j , мм	Z_j , Ом	w_j , мм	$\lambda_{\text{э}j}/4$, мм
1	12.18	50	1.0	21.37
2	2.36	50	1.0	21.37
3	13.52	25	2.0	20.66
4	22.59	100	0.2	22.59

2. *Электрическая схема, топология и технические характеристики.* На рис. 5 показана электрическая схема автогенератора в микрополосковом исполнении на двух поликорových подложках размером $24 \times 30 \times 1$ мм.

Топология автогенератора показана на рис. 6. Шлейфы обозначены своими относительными электрическими длинами $L_j = l_j / \lambda_{\text{э}j}$. Длина выходного шлейфа L_5 определяется конструктивными ограничениями, его волновое сопротивление $Z_5 = 50$ Ом. Разброс электрических параметров

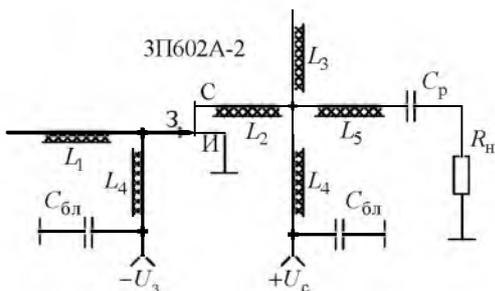


Рис. 5

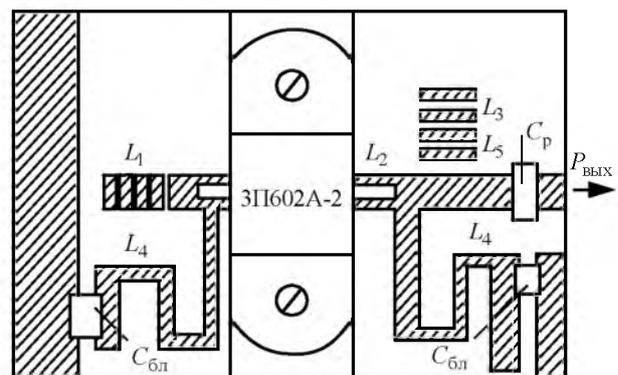


Рис. 6

ров ПТБШ компенсируется изменением длины шлейфа L_1 в пределах $0.1 < L_1 < 0.25$, что обеспечивает перестройку резонансной частоты f на $\pm 10\%$. Изменение длины шлейфа L_3 в пределах $0 < L_3 < 0.16$ обеспечивает подстройку выходной мощности $P_{\text{вых}} = P_{\text{вых max}}$. В автогенераторе использованы блокировочные конденсаторы $C_{\text{бл}} = 3300$ пФ и разделительный конденсатор $C_{\text{р}} = 1300$ пФ марки К10-9.

Основные технические характеристики автогенератора приведены в табл. 3.

Таким образом, выполнен расчет автогенератора без внешней ОС в пространстве S -параметров, разработана его электрическая схема и топология.

Предложенная методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S -параметров базируется на качественно новом представлении условия самовозбуждения автогенератора, которое записано в комплексной форме. Она позволяет осуще-

Таблица 3

Параметр	Значение
Частота генерации (f), ГГц	1.36
Относительная нестабильность (δ_f), %, при $t = \pm 50$ °С	$10^{-3} \dots 10^{-4}$
Выходная мощность ($P_{\text{вых}}$), мВт	40
Напряжение затвора (U_3), В	-2.5
Напряжение стока (U_c), В	6.5

ствить расчет нагрузочных ККО АК Γ_{Hj} автогенератора, обеспечивающих требуемую частоту генерации (f) и максимальную выходную мощность ($P_{\text{вых}} = P_{\text{вых max}}$), а также позволяет осуществить приближенную оценку значения этой мощности. Методика применима в среде на базе пакета MWO, облегчает выбор оптимальной электрической схемы автогенератора и синтез его топологии, тем самым повышая эффективность систем автоматизированного проектирования этих СВЧ-устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резевиг В. Д., Потапов Ю. В., Курушин А. А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office / под ред. В. Д. Резевига. М.: СОЛОН-Пресс, 2003. 496 с.
2. 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., Новосибирск, 8–18 апр. 2014 г.; Междунар. науч. конф. "СибОптика-2014": сб. материалов: в 2 т. Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 2. С. 164–171.

3. Полупроводниковые входные устройства СВЧ: в 2 т. Т. 1 / под ред. В. С. Эткина. М.: Сов. радио, 1975. 344 с.

4. Савелькаев С. В. Теоретические основы построения двухсигнальных анализаторов СВЧ-цепей // Измерительная техника. 2005. № 3. С. 41–46.

5. Савелькаев С. В. Методы анализа устойчивости активных СВЧ-цепей и измерения их S -параметров // Метрология. 2005. № 4. С. 19–28.

S. V. Savelkaev, N. V. Zarzhetskaya

Siberian State University of Geosystems and Technologies (Novosibirsk)

Calculation and design of self-excitation microwave devices in the S -parameters space

The technique of calculation of the microwave oscillator in the S -parameters space without external feedback and with parallel or serial external feedback of the active component (AC) is considered. The technique basis on the conditions of oscillator self-excitation, written in the complex form, and allows to calculate the complex AC loads reflection factors and the parameters of the external feedback providing the desired oscillation frequency and the maximum output power and approximately estimate the value of this power. Analysis of the AC stability and the self-excitation conditions ensures selection of the correct electrical circuit of the oscillator and the calculated AC loads complex reflection factors and the external feedback parameters ensures a synthesis of the considered oscillator topology.

Microwave oscillator, S -parameters and load complex reflection factors, feedback, self-excitation condition, generation frequency, output power, electrical diagram, topology

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2015 г.