



УДК 621.317.744

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

Теоретические основы построения имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ

Предложен принцип построения имитатора-анализатора, обеспечивающего имитационное моделирование усилителей и автогенераторов СВЧ в коаксиальном измерительном тракте в соответствии с техническим заданием с последующим измерением комплексных коэффициентов отражения нагрузок активного компонента этих устройств для дальнейшего их проектирования в микрополосковом исполнении. Сформирована математическая модель имитатора-анализатора, а также математическая модель его калибровки. Рассмотрен метод анализа устойчивости активного компонента в пространстве комплексных коэффициентов отражения его нагрузок, облегчающий выбор этих нагрузок и активного компонента при имитационном моделировании усилителей и автогенераторов. Дополнительно рассмотрена возможность использования имитатора-анализатора для измерения комплексных коэффициентов отражения на входе и выходе нагруженного активного компонента, а также измерения его комплексных коэффициентов передачи, которые совместно с измеренными комплексными коэффициентами отражения нагрузок позволяют по предложенной методике определить S-параметры анализируемого компонента, которые он будет иметь при включении в микрополосковую линию.

Имитатор-анализатор, математическая модель, калибровка, комплексный коэффициент отражения и передачи, метод анализа устойчивости, методика определения S-параметров, методика переноса результатов измерения из коаксиального тракта в микрополосковый

В настоящее время расчет и проектирование усилителей и автогенераторов СВЧ [1], [2] осуществляют в пространстве измеренных S-параметров активного компонента (АК) этих устройств, например транзистора [3], [4]. S-параметры позволяют проанализировать устойчивость АК [1], что облегчает выбор АК, требуемого для реализации усилителя или автогенератора. Кроме того, S-параметры позволяют рассчитать комплексные коэффициенты отражения (ККО) нагрузок АК (нагрузочные ККО Γ_{Hj} на входе ($j = 1$) и на выходе ($j = 2$)), обеспечивающие требуемые по техническому заданию (ТЗ) полосу пропускания усилителя (Δf), частоту генерации автогенератора (f), их требуемую выходную мощность ($P_{\text{вых}}$), а также последующий расчет топологий согласующих цепей (СЦ) при проектировании этих устройств.

Существенный недостаток расчета и проектирования усилителей и автогенераторов в указанном пространстве заключается в том, что S-па-

раметры АК, который является нелинейным прибором, измеряются в согласованном измерительном тракте, где режим работы АК далек от режима работы в реальном усилителе или автогенераторе. В результате измеренные S-параметры не соответствуют S-параметрам АК в реальном усилителе или автогенераторе (неадекватное измерение), что приводит к низкой экономической эффективности проектирования этих устройств из-за необходимости многократной технологической коррекции опытного образца.

Целью настоящей статьи является повышение эффективности систем автоматизированного проектирования (САПР) усилителей и автогенераторов СВЧ. Предложен принцип построения имитатора-анализатора (ИА), обеспечивающего имитационное моделирование усилителей и автогенераторов в соответствии с их ТЗ с последующим измерением нагрузочных ККО Γ_{Hj} АК для непосредственного расчета и проектирования таких устройств. Дополнительно ИА обеспечивает измерение ККО Γ_j на входе и выходе нагруженного

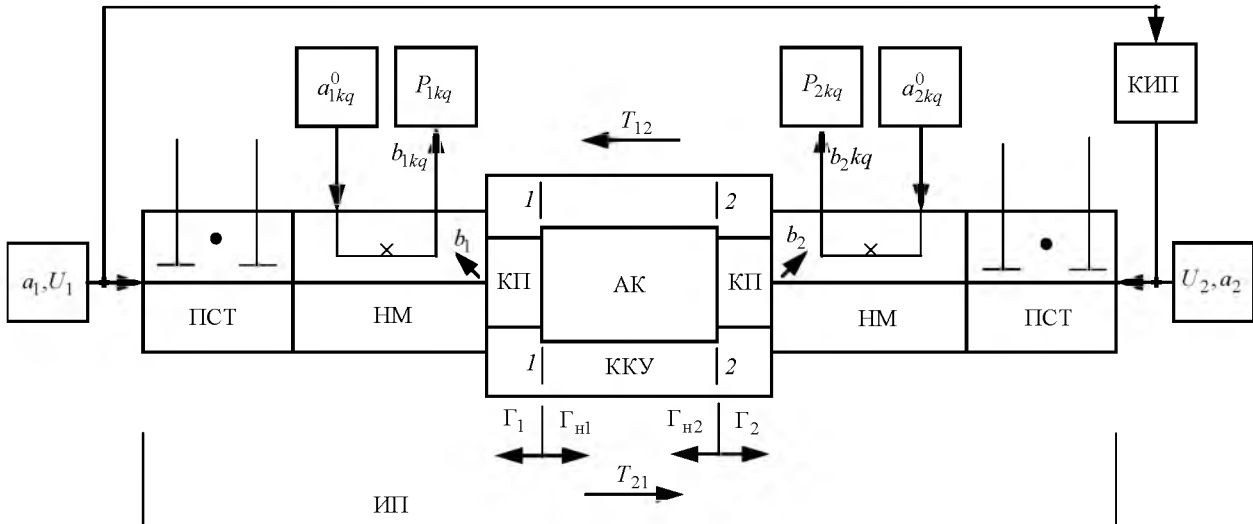


Рис. 1

АК, а также измерение его комплексных коэффициентов передачи (ККП) T_{ij} для последующего определения S -параметров. Сформирована математическая модель ИА, а также математическая модель его калибровки. Рассмотрен метод анализа устойчивости АК в пространстве нагрузочных ККО $\Gamma_{нj}$, облегчающий их выбор при имитационном моделировании усилителей и автогенераторов, а также предложена методика определения S -параметров АК.

Структурная схема и конструкция ИА.

Упрощенная структурная схема ИА показана на рис. 1 [3], [4]. Его основным функциональным узлом является измерительный преобразователь (ИП) [3]. Он содержит коаксиальное контактное устройство (ККУ) [5], [6] к каждому из двух коаксиальных переходов (КП_{*i*}, *i* = 1, 2) которого подключен пятнадцатидецибелльный направленный мост (НМ) второго типа, обеспечивающий преобразование измеряемых ККО Γ_i на входе и выходе АК, его нагрузочных ККО $\Gamma_{нj}$, *j* = 1, 2, а также его ККП T_{ij} в измеряемые мощности P_{ikq} ¹. Каждый из НМ нагружен на перестраиваемый согласующий трансформатор (ПСТ) с $N_{ш} \leq 3$ емкостными шлейфами, задающими нагрузочные ККО $\Gamma_{нj}$ АК, что обеспечивает имитационное моделирование усилителя или автогенератора в соответствии с ТЗ на их разработку. Технические характеристики имитируемых устройств регистрируются с помощью контрольно-измерительных приборов

(КИП). АК имитируемого устройства подключен в плоскостях *i-i* измерительных входов КП ККУ.

ИП выполнен в виде самостоятельного функционального узла, конструкция которого показана на рис 2, а. Он содержит основание 1, на каждом из двух подвижных столов 2 которого размещены: адаптеры 3, подающие напряжения питания на АК 4 со стороны входа (U_1) и выхода (U_2), ПСТ 5, НМ 6. К измерительным входам НМ 6 подключены КП 7 ККУ.

КП 7 позволяют посредством подпружиненных цапг 8 подключить в плоскостях 1-1 и 2-2 измерительных входов АК 4, размещенный на пьедестале 11. Подключение АК с ленточными выводами 9 показано на рис. 2, б; АК с микрополосковыми выводами 10 – на рис. 2, в. Кроме того, КП 7 позволяют подключить в указанных плоскостях измерительного входа коаксиальные меры 12 (рис. 2, з) или микрополосковые калибраторы 13 (рис. 2, д) с ленточными выводами 9 при калибровке ИА.

Перемещение подвижных столов 2 (рис. 2, а) при подключении коаксиальных мер 12 (рис. 2, з) осуществляется с помощью приводного механизма 14 (рис. 2, а), а перемещение КП 7 при подключении АК 4 с ленточными 9 (рис. 2, б) или микрополосковыми 10 (рис. 2, в) выводами, а также микрополосковых калибраторов 13 – с помощью фиксаторов 15. Возможность горизонтального перемещения каждого из КП 7 (рис. 2, б) обеспечивается коаксиальным тромбоном 16.

При калибровке ИА пьедестал 11 (рис. 2, а-в) удаляется и плоскости 1-1 и 2-2 измерительных входов КП 7 могут быть включены встык. При этом цапга 8 с большим усилием пружины утапливает цапгу 8 другого КП 7 с меньшим усилием пружины аналогично рис. 2, з. Резьбовую втулку

¹ *k, q* – номера сдвига фазы опорного сигнала относительно зондирующего сигнала и амплитуды опорного сигнала соответственно.

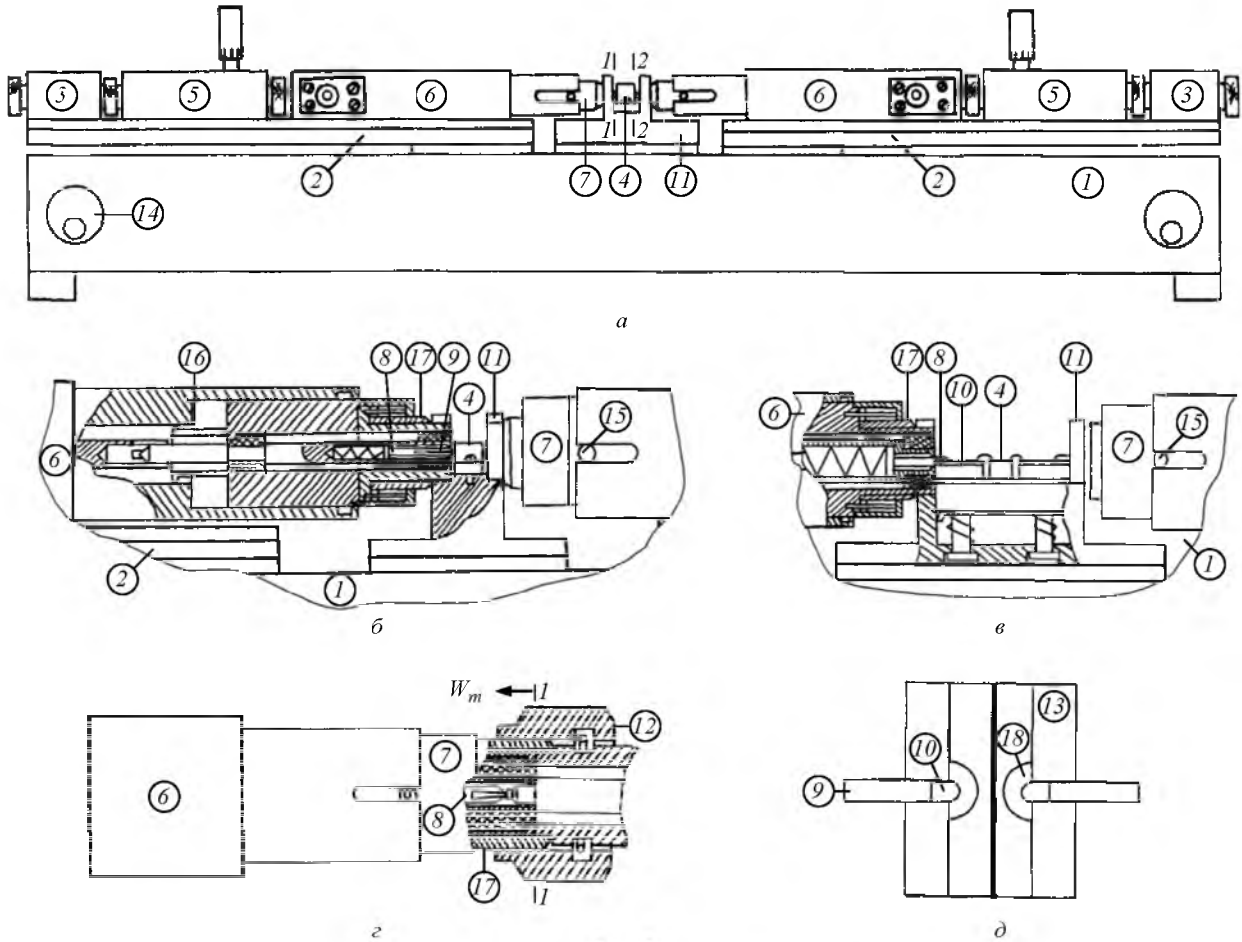


Рис. 2

17 одного из КП 7 (рис. 2, б, в) надвигают на другой КП 7 (рис. 2, з).

Математическая модель ИА. Комплексная амплитуда сигнала b_{ikq} на выходном плече i -го НМ может быть определена как в [9]–[11]:

$$b_{ikq} = \frac{A_{i1} + B_{i1}\Gamma_{Hj}}{1 + C_i\Gamma_{Hj}} a_i + \frac{A_{i2} + B_{i2}\Gamma_{Hj}}{1 + C_i\Gamma_{Hj}} a_{ikq}^0, \quad (1)$$

где $k = \overline{1, 3}$; $q = \overline{1, Q}$; A_{im} , B_{im} , C_i , i , $m = 1, 2$ – эквивалентные комплексные константы i -го НМ; a_i ; a_{ikq}^0 – i -е зондирующий и опорный сигналы соответственно.

Нагрузочные ККО АК Γ_{Hj} задаются посредством ПСТ (рис. 1) и измеряются при соединении плоскостей i - i измерительных входов КП встык.

Из (1) получим уравнение преобразования, описывающее действие i -го НМ:

$$P_{ikq} = |b_{ikq}|^2 / 2 = E_{iq} \left[1 + |\rho_{iq}|^2 + 2|\rho_{iq}| \cos(\varphi_{i\rho} + \varphi_{ik}) \right], \quad (2)$$

где $P_{ikq} = U_{ikq}^2 / 2$ – мощность, которая в случае квадратичного детектирования определена напряжением U_{ikq} , измеряемым на выходном плече i -го НМ; E_{iq} – амплитудный коэффициент, зависящий от мощности опорного сигнала $P_{iq}^0 = |a_{iq}^0|^2 / 2$; ρ_{iq} – эквивалентный ККО с амплитудой $|\rho_{iq}|$ и фазой $\varphi_{i\rho}$; φ_{ik} – текущий k -й сдвиг фазы опорного сигнала a_{ikq}^0 относительно фазы зондирующего сигнала a_i .

Эквивалентный ККО измеряемого нагрузочного ККО Γ_{Hj} определяется следующим образом:

$$\rho_{iq} = C_{i1} \frac{1 + C_{i2}\Gamma_{Hj}}{1 + C_{i3}\Gamma_{Hj}} \chi_{iq}, \quad i, j = 1, 2, i \neq j, \quad (3)$$

где

$$C_{i1} = (A_{i1}/A_{i2}) A_i \exp j\theta_{i1};$$

$$C_{i2} = B_{i1}/A_{i1}; \quad C_{i3} = B_{i2}/A_{i2}$$

– приведенные комплексные константы i -го НМ;

$$\chi_{iq} = \left| a_i / a_{iq}^0 \right| = A_i \cdot 10^{\alpha_{iq}/20} \quad (4)$$

– относительная амплитуда зондирующего сигнала a_i на q -м поддиапазоне измерения нагрузочного ККО, причем $A_i = \left| a_i / a_{iq}^0 \right|$ – неизвестное начальное отношение амплитуд (α_i – ослабление амплитуды опорного сигнала a_{ikq}^0 на q -м поддиапазоне измерения); $\theta_{i1} = \varphi_1 - \varphi_{i1}^0$ – неизвестный начальный сдвиг фазы φ_{ik}^0 опорного сигнала относительно фазы φ_i зондирующего сигнала. Начальное отношение амплитуд A_i и начальный фазовый сдвиг θ_{i1} подлежат исключению при последующей калибровке ККО с использованием (3).

Дискретный k -й фазовый сдвиг определяется как $\varphi_{ik} = \pm \sum_k \theta_{ik}$, $k = \overline{1, 3}$, где $\theta_{ik} = \varphi_i - \varphi_{ik}^0$, причем при $k = 1$ θ_{i1} – определенный ранее неизвестный начальный сдвиг фазы φ_{ik}^0 опорного сигнала относительно фазы φ_i зондирующего сигнала, а при $k = 2, 3$ θ_{ik} – его известные дискретные приращения. Знак "плюс" выбирается, если стоячая волна мощности P_{iq} движется к плоскости ее индикации, и "минус" – при движении в противоположном направлении.

Эквивалентный ККО ρ_{iq} (3) задает динамический диапазон стоячей волны мощности:

$$\Delta_i = 10 \lg \frac{1 + |\rho_{iq}|^2 + 2|\rho_{iq}|}{1 + |\rho_{iq}|^2 - 2|\rho_{iq}|} = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (5)$$

с ее максимумом P_{\max} и минимумом P_{\min} .

По эквивалентному ККО ρ_{iq} (3) значения измеренных нагрузочных ККО Γ_{ij} АК можно определить из формулы

$$\Gamma_{ij} = \frac{G_{i1} \tilde{\chi}_{iq} - \tilde{\rho}_{iq}}{G_{i3} \tilde{\rho}_{iq} - G_{i2} \tilde{\chi}_{iq}}, \quad (6)$$

полученной посредством нормировки (3) на величину $\tilde{\rho}_{iq} = \rho_{iq} / \rho_{i14}$, где

$$G_{i1} = \left[(1 - C_{i1}) / (1 - C_{i2}) \right]; \quad G_{i3} = C_{i3} G_{i1}; \quad G_{i2} = C_{i2} G_{i1}$$

– нормированные комплексные параметры i -го НМ;

$$\tilde{\chi}_{iq} = \chi_{iq} / \chi_{i1} = 10^{(\alpha_{iq} - \alpha_{i1})/20}; \quad i, j = 1, 2; \quad i \neq j \quad (7)$$

– нормированная относительная амплитуда на q -м поддиапазоне; ρ_{i14} – эквивалентный ККО эквивалентного ККО ρ_{iq} , измеренный при калибровке ИА короткозамкнутой подвижной коаксиальной мерой с ККО $\Gamma_i = W_4 = -1$, подключаемой к плоскости $i-i$ измерительного входа КП на первом поддиапазоне (χ_{i1} и α_{i1} – начальная относительная амплитуда (4) и начальное ослабление амплитуды опорного сигнала a_{ikq}^0 на первом поддиапазоне).

Для определения измеренного эквивалентного ККО ρ_{iq} , входящего в (3), уравнение (2) было преобразовано в систему измерительных уравнений вида

$$x_{i1} + a_{ik2} x_{i2} + a_{ik3} x_{i3} = a_{ikq4}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (8)$$

где $a_{ik2} = 2 \cos \varphi_{ik}$; $a_{ik3} = -2 \sin \varphi_{ik}$; $a_{ikq4} = P_{ikq}$.

Решение системы уравнений (8) относительно переменных x_{ik} , $k = \overline{1, 3}$, под которыми понимаются мощности P_{ikq} , определяемые через измеряемые напряжения U_{ikq} (2), позволяет при $q = \text{const}$ определить модуль $|\tilde{\rho}_{iq}|$ и фазу $\tilde{\varphi}_{ip}$ эквивалентного ККО $\tilde{\rho}_{iq}$, входящего в (6), следующим образом:

$$\begin{aligned} |\tilde{\rho}_{iq}| &= \beta_i / 2 \pm \sqrt{\beta_i^2 / 4 - 1}, \\ \tilde{\varphi}_{ip} &= \arctg(x_{i3} / x_{i2}), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\beta_i = \sqrt{(x_{i2} / x_{i1})^2 + (x_{i3} / x_{i1})^2}$; $i, j = 1, 2; \quad i \neq j$.

Таким образом, решение системы измерительных уравнений (8) для трех значений регистрируемых мощностей P_{ikq} , $k = \overline{1, 3}$ позволяет из (9) определить эквивалентный ККО $\tilde{\rho}_{iq}$ измеряемого нагрузочного ККО Γ_{ij} и нормирующий ККО ρ_{i14} , а затем из (6) получить измеренный нагрузочный ККО Γ_{ij} .

Если же ослабление α_{iq} амплитуды опорного сигнала a_{ikq}^0 неизвестно, нормированную относительную амплитуду $\tilde{\chi}_{iq}$ на q -м поддиапазоне, входящую в (6), вместо (7) можно определить как

$$\tilde{\chi}_{iq} = \left| \tilde{\rho}_{iqq} \frac{1 + G_{i3} W_q}{G_{i1} + G_{i2} W_q} \right|, \quad (10)$$

где $\tilde{\rho}_{iqq} = \rho_{iqq} / \rho_{i14}$ – нормированное значение эквивалентного ККО ρ_{iqq} , измеряемого при калибровке ИА короткозамкнутой подвижной коаксиальной мерой с ККО $\Gamma_i = W_q$, подключаемой к плоскости $i-i$ измерительного входа КП на q -м поддиапазоне измерения.

Количество поддиапазонов Q измерения нагрузочных ККО Γ_{ij} с модулем $0 < |\Gamma_{ij}| \leq 1$ для каждого i -го НМ выбираются так, чтобы на каждом q -м поддиапазоне выполнялось двухстороннее амплитудное ограничение $\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ (безусловная адаптация ИА) [7], где Δ – текущее значение динамического диапазона; Δ_{\min} , Δ_{\max} – предельно допустимые минимальное и максимальное значения динамического диапазона Δ (5). Кроме того, согласно [7], дискретное приращение θ_{i2} , θ_{i3} фазы φ_{ik}^0 опорного сигнала a_{ikq}^0 должно удовлетворять фазовому условию $\theta_{i2}, \theta_{i3} = \theta_0$, где θ_0 – оптимальное значение дискретного приращения. При одновременном выполнении этих условий суммарная погрешность Δ_Γ измерения нагрузочного ККО Γ_{ij} с модулем $0 < |\Gamma_{ij}| \leq 1$ не превышает предела ее допуска $\Delta_\Gamma \leq [\Delta_\Gamma]$ [7], [8]. При $\Delta_{\min} = 6$ дБ $\Delta_{\max} = 14$ дБ и она составляет по модулю $|\Delta_\Gamma| \leq [\Delta_\Gamma] = 0.06|\Gamma|$. Фазовый допуск при $\theta_0 = \pm 2\pi/3$ составляет $\varphi_\Gamma \leq [\varphi_\Gamma] = 5^\circ$.

Режим безусловной адаптации ИА, которому в (9) соответствует знак плюс, реализуется при $|a_{iq}^0| \leq |a_i|$. Если же $|a_{iq}^0| \geq |a_i|$ реализуется режим адаптации ИА сверху в виде одностороннего амплитудного ограничения $\Delta \leq \Delta_{\max}$ [7], [8]. Этому режиму в (9) соответствует знак "минус". Недостатком последнего режима является то, что предельная суммарная погрешность измерения нагрузочного ККО Γ_{ij} при его модуле $|\Gamma_{ij}| \leq 0.3$ превышает предел ее допуска $\Delta_\Gamma > [\Delta_\Gamma]$ [7], [8].

Уравнение (2), система уравнений (8), а также выражения (6), (7), (9), (10) образуют математическую модель ИА, которая позволяет определить измеренные нагрузочные ККО Γ_{ij} АК.

Калибровка ИА. Возможность подключения к КП 7 ККУ [5], [6] стандартных коаксиальных мер 12 (см. рис. 2, з) позволяет осуществить калибровку

ИА относительно плоскостей $i-i$ измерительных входов КП, которые одновременно являются плоскостями подключения АК 4 с ленточными 9 (рис. 2, б) или полосковыми 10 (рис. 2, в) выводами, которые подключаются к КП 7 посредством цанг 8.

Для определения комплексных параметров G_{i1} , G_{i2} и G_{i3} , входящих в (6), необходимо выполнить четыре измерения напряжений U_{ikqm} , $m = \overline{1, 4}$ (2) на выходном плече i -го НМ при подключении к плоскости $i-i$ входа КП стандартной подвижной короткозамкнутой меры для четырех различных фиксированных значений ее фазы [7]:

$$\varphi_m = 2\beta l_m \pm \pi, \quad (11)$$

где $\beta = 2\pi/\lambda$ и $l_m \leq \lambda/4$ – фазовые постоянная и переменная шкалы этой меры, причем при $m = 4$ $l_4 = 0$, $W_4 = -1$; λ – длина волны.

Измерение напряжений U_{ikqm} (2) и определение эквивалентного ККО ρ_{ikqm} (7) необходимо осуществлять на первом поддиапазоне ($q = 1$). При этом начальное ослабление α_{i1} относительной амплитуды $\tilde{\chi}_{i1}$ (7) и фазовые сдвиги θ_{i2} , θ_{i3} должны быть выбраны так, чтобы динамический диапазон Δ_i (5) и фазовый сдвиг удовлетворяли амплитудному условию $\Delta_i \cong \Delta_0 = (\Delta_{\min} + \Delta_{\max})/2$ и фазовому условию $\theta_{i2}, \theta_{i3} \cong \theta_0$, что обеспечивает минимум погрешности $\Delta W_m = \min \Delta W_m \cong \min \Delta_{\Gamma_i}^1$ измерения ККО $\Gamma_i = W_m$ и, следовательно, минимум погрешности $\Delta G_{ij} = \min G_{ij}$ последующего определения эквивалентных комплексных параметров G_{ij} (6) i -го НМ.

Так как для первого поддиапазона нормированная амплитудная метрика $\tilde{\chi}_{iq} = 1$ (7), выражение (8) при $\Gamma_i = W_m$ было преобразовано к виду

$$G_{i1} + a_{im2}G_{i2} + a_{im3}G_{i3} = a_{im4}; \quad m = \overline{1, 3}, \quad (12)$$

где $a_{im2} = -W_m$; $a_{im3} = -\tilde{\rho}_{ilm}W_m$; $a_{im4} = \tilde{\rho}_{ilm}$, причем $\tilde{\rho}_{ilm} = \rho_{ilm} / \rho_{i14}$; ρ_{i14} – нормированный эквивалентный ККО измеряемого ККО $\Gamma_i = W_m$ подвижной короткозамкнутой меры, подключаемой в плоскости $i-i$ измерительных входов КП в трех состояниях ее фазы φ_m (11) и нормирующей эквивалентный ККО измеряемого ККО $\Gamma_i = W_4 = -1$ этой меры при $m = 4$.

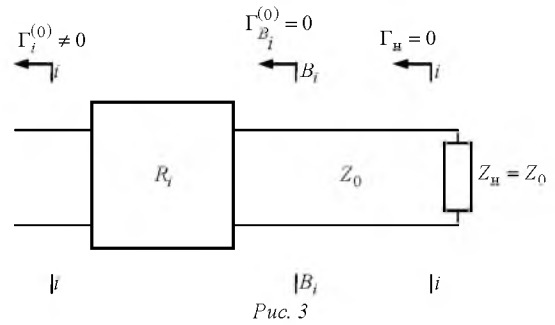
Решение системы уравнений (12) позволяет определить комплексные параметры $G_{i1} = D_{i1}/D$, $G_{i2} = D_{i2}/D$; $G_{i3} = D_{i3}/D$ (8) i -го НМ, где D_{i1} , D_{i2} , D_{i3} и D – определители системы.

Для определения нормированной относительной амплитуды $\tilde{\chi}_{iq}$ (10) на q -м поддиапазоне измерения необходимо измерить напряжения U_{ikqq} (2) на выходном плече i -го НМ при подключении в плоскости $i-i$ измерительного входа КП 7 коаксиальной меры 12 (см. рис. 2, ε) с модулем ККО $|W_q| = \{1.00; 0.80; 0.50; 0.33; 0.18\}$. Значения модулей выбираются так, чтобы предельно допустимый интервал динамического диапазона $\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ для нагрузочного ККО Γ_{Hj} с модулем $0 < |\Gamma_{Hj}| \leq 1$ не нарушался. Согласно указанному набору значений модуля ККО для обеспечения условия $\Delta_{\Gamma} \leq [\Delta_{\Gamma}]$ количество поддиапазонов измерения должно составлять $Q = 5$.

После измерения напряжений U_{ikqq} определяют эквивалентный ККО ρ_{iqq} (9) измеряемого ККО W_q . При этом ослабление α_{iq} относительной амплитуды $\tilde{\chi}_{iq}$ (7) на q -м поддиапазоне должно быть выбрано так, чтобы динамический диапазон (5) эквивалентного ККО ρ_{iqq} измеряемого ККО W_q составлял $\Delta_i \cong \Delta_0 = (\Delta_{\min} + \Delta_{\max})/2$ при θ_{i2} , $\theta_{i3} \cong \theta_0$, что обеспечивает минимум погрешности $\Delta W_q = \min \Delta W_q \cong \min \Delta_{\Gamma_i}^1$ его измерения.

Система измерительных уравнений (8) совместно с системой уравнений (12) представляют собой математическую модель калибровки ИА, позволяющую определить комплексные параметры G_{i1} , G_{i2} и G_{i3} (6) его i -го НМ и нормированную относительную амплитуду $\tilde{\chi}_{iq}$ (10) на $q = \overline{1, Q}$ поддиапазонах измерения нагрузочных ККО Γ_{Hj} .

Для переноса результатов калибровки анализатора коаксиальными мерами на измерение ККО Γ_{Hj} нагрузок, включенных в микрополосковый тракт, в котором в последующем будет осуществлен расчет и проектирование усилителя или автогенератора, необходима калибровка КП расчетным микрополосковым калибратором 13 (см. рис. 2, δ) или же двумя отрезками микрополосковой линии (МПЛ) [5], [6]. Калибратор содержит отрезки



МПЛ 10, которые с одной стороны нагружены на согласованную резистивную нагрузку 18, а с другой – снабжены ленточным выводом 9. Схема подключения такого калибратора к КП показана на рис. 3, где Z_0 – волновое сопротивление отрезка МПЛ, нагруженного на согласованную нагрузку с сопротивлением $Z_H = Z_0$.

При подключении МПЛ к КП в плоскостях $i-i$ возникают неоднородности, обусловленные конструктивным различием этих узлов. В процессе измерений ККО $\Gamma_i^{(0)}$ при калибровке КП эти неоднородности моделируются вводом вспомогательных плоскостей $B_i - B_i$ и расположением между плоскостями $i-i$ и $B_i - B_i$ четырехполюсников с R_i -параметрами рассеяния, характеризующих указанные неоднородности. При этом плоскости $i-i$ и $B_i - B_i$ для одинаковых значений i совмещены в пространстве, а в плоскостях $B_i - B_i$ ККО $\Gamma_{B_i}^{(0)} = 0$.

По измеренным ККО $\Gamma_i^{(0)}$ R_i -параметры рассеяния определяются следующим образом:

$$\begin{cases} R_{11i} = \Gamma_i^{(0)}; \\ R_{12i} = R_{21i} = (1 + R_{11i})\sqrt{Z_i/Z_0}; \\ R_{22i} = (1 + R_{11i})Z_i/Z_0 - 1, \end{cases} \quad i = 1, 2; \quad (13)$$

где Z_i – волновое сопротивление КП, равное волновому сопротивлению коаксиальных мер, используемых при калибровке ИА.

R_i -параметры могут быть нормированы на волновое сопротивление Z_0 согласованного полоскового калибратора, выбранного для калибровки КП.

Выражения (12) и (13) представляют собой математическую модель калибровки ИА.

С учетом R_i -параметров (13) нагрузочные ККО Γ'_{Hj} АК в микрополосковом тракте определяются следующим образом:

$$\Gamma'_{Hj} = (R_{1i} - \Gamma_{Hj}) / (\Delta R_i - R_{22i} \Gamma_{Hj}), \quad (14)$$

где $\Delta R_i = R_{11i} R_{22i} - R_{12i} R_{21i}$; $i, j = 1, 2$; $i \neq j$.

Метод анализа устойчивости. Предварительным этапом имитационного моделирования усилителя или автогенератора является анализ устойчивости их АК [4]. Сущность такого анализа сводится к измерению трех значений нагрузочных ККО АК $\Gamma_{Hj}^{(m)}$, $m = \overline{1, 3}$ в режиме регенерации, который является промежуточным режимом между режимами усиления и автогенерации (рис. 4).

Измеренные нагрузочные ККО $\Gamma_{Hj}^{(m)}$ позволяют определить границы O_j , разделяющие комплексные плоскости входного ($j = 1$) и выходного ($j = 2$) нагрузочных ККО Γ_{Hj} АК на устойчивые области (на рис. 4 отмечены знаком "+") и неустойчивые области (отмечены знаком "-"). Координаты центров r_j , φ_j границ O_j этих областей и их радиусы R_j являются параметрами устойчивости.

Метод анализа устойчивости реализуется следующим образом. АК посредством входного и выходного ПСТ вводят в режим устойчивой автогенерации, выбирая его нагрузочные ККО Γ_{Hj} , так, чтобы они находились в неустойчивых областях их комплексной плоскости (знаки "-" на рис. 4, где точками $j = 1, 2$ отмечены выбранные значения). При этом в каждом из ПСТ используют только один шлейф ($N_{ш} = 1$).

Далее при фиксированном значении выходного нагрузочного ККО $\Gamma_{H2} = \text{const}$ в точке $j = 2$ осуществляют прогонку входного нагрузочного ККО Γ_{H1} , уменьшая, а затем увеличивая модуль с вариацией фазы φ_1 в пределах $0 \dots 2\pi$ для каждого

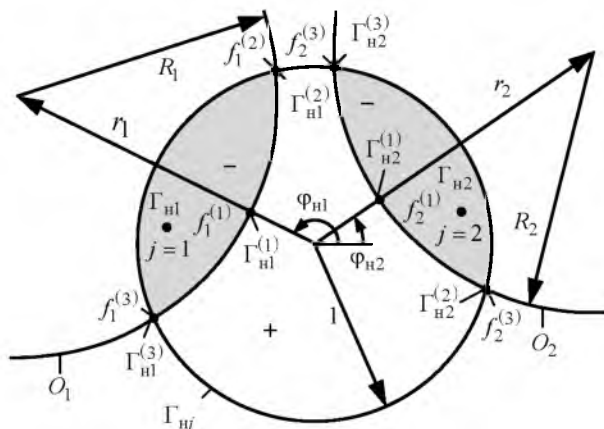


Рис. 4

из выбираемых значений модуля $0 \leq |\Gamma_{H1}| \leq 1$. Изменение модуля $|\Gamma_{H1}|$ обеспечивается изменением глубины погружения емкостного шлейфа входного ПСТ, а его фазы φ_1 – перемещением этого емкостного шлейфа по длине ПСТ.

Прогонкой входного нагрузочного ККО Γ_{H1} находят минимальное $\Gamma_{H1}^{(1)}$ и два максимальных граничных значения его модуля $\Gamma_{H1}^{(2)}$, $\Gamma_{H1}^{(3)}$ (рис. 4), при которых наблюдается срыв автогенерации. После этого АК отключают и измеряют эти три значения нагрузочных ККО Γ_{H1} при непосредственном соединении КП встык. Далее возвращают входной нагрузочный ККО Γ_{H1} в исходную точку $j = 1$ и аналогично измеряют три значения $\Gamma_{H2}^{(1)}$, $\Gamma_{H2}^{(2)}$ и $\Gamma_{H2}^{(3)}$ выходного нагрузочного ККО Γ_{H2} .

Параметры устойчивости r_j , φ_j и R_j – координаты центра и радиусы границ O_j неустойчивых областей нагрузочных ККО Γ_{Hj} – определяются решением системы уравнений

$$|\Gamma_{Hj}^{(m)}| = x_j + a_m y_j + b_m z_j, \quad m = \overline{1, 3},$$

где $a_m = 2 |\Gamma_{Hj}^{(m)}| \cos \varphi_{Tj}^{(m)}$; $b_m = 2 |\Gamma_{Hj}^{(m)}| \sin \varphi_{Tj}^{(m)}$ – константы, значения которых зависят от модуля $|\Gamma_{Hj}^{(m)}|$ и фазы $\varphi_{Tj}^{(m)}$ измеренных нагрузочных ККО;

$$x_j = R_j^2 - r_j^2; \quad y_j = r_j \cos \varphi_j; \quad z_j = r_j \sin \varphi_j$$

– переменные, с учетом которых определяются параметры устойчивости:

$$r_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2}; \quad \varphi_j = \arccos(y_j / r_j); \quad R_j = \sqrt{x_j^2 + r_j^2}.$$

Значения модуля нагрузочного ККО $|\Gamma_{Hj}|$, принадлежащие границам O_j , в зависимости от его фазы φ_{Tj} , можно рассчитать по формуле

$$|\Gamma_{Hj}| = R_j \cos(\varphi_j - \varphi_{Tj}) - \sqrt{R_j^2 \cos^2(\varphi_j - \varphi_{Tj}) + r_j^2}.$$

При необходимости может быть определен максимально достижимый диапазон перестройки частоты f_j автогенерации АК по его входу и выходу:

$$\Delta f_j = |f_j^{(2)} - f_j^{(3)}|,$$

где $f_j^{(2)}$ и $f_j^{(3)}$ – частоты срыва автогенерации (см. рис. 4).

При имитационном моделировании усилителей во входном и выходном ПСТ используются три шлейфа, что обеспечивает относительную полосу пропускания порядка 10–15 % на центральной частоте f в пределах 4...12 ГГц. При имитационном моделировании автогенераторов используется один шлейф. При имитационном моделировании усилителей нагрузочные ККО Γ_{Hj} выбираются в устойчивой области (символ "+" на рис. 4), а при имитационном моделировании автогенераторов – в их неустойчивых областях (символы "-").

Методика определения S-параметров. Предлагаемая методика усовершенствует аналогичную приближенную методику работ [3], [4]. Для определения S-параметров нагруженного АК необходимо дополнительно измерить ККО Γ_i на его входе ($i=1$) и выходе ($i=2$), а также его ККП T_{ij} ($i, j=1, 2, i \neq j$) (см. рис. 1) при включении АК в ККУ.

Измерение ККО АК Γ_i аналогично измерению его нагрузочных ККО Γ_{Hj} при замене в выражениях (6) Γ_{Hj} на Γ_i .

Для выяснения физической сущности измерения ККП АК T_{ij} представим его сигнальным графом в виде нагруженного четырехполюсника (рис. 5, а, где нагрузочные ККО Γ_{Hj} отнесены к плоскостям $i-i$ его входа ($i, j=1$) и выхода ($i, j=2$)).

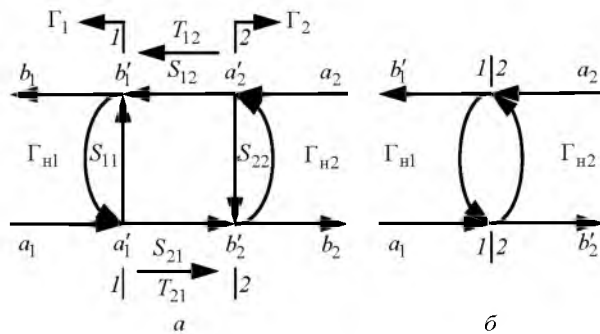


Рис. 5

Измерение ККП T_{ij} осуществляется в следующем порядке. Первоначально измеряется отношение комплексных амплитуд (КА) волны b_i , прошедшей через АК к плоскости $i-i$ его входа ($i=1$) или выхода ($i=2$) (рис. 5, а), и i -го опорного сигнала a_{iq}^0 :

$$\rho_{iq} = \frac{b_i}{a_{iq}^0} \Big|_{a_i=0, a_i^0 \neq 0, a_j \neq 0, i, j=1, 2, i \neq j}, \quad (15)$$

где ρ_{iq} – измеряемый эквивалентный ККО, который может быть определен из (6) и (7).

Далее измеряется отношение КА прошедшей к соединенным встык плоскостям $i-i$ ($i=1, 2$) волны b_i' к i -му опорному сигналу a_{iq}^0 (рис. 5, б):

$$\rho'_{iq} = \frac{b_i'}{a_{iq}^0} \Big|_{a_i=0, a_i^0 \neq 0, a_j \neq 0, i, j=1, 2, i \neq j}, \quad (16)$$

где ρ'_{iq} – измеряемый эквивалентный ККО, который также может быть определен из (6) и (7).

Из сигнального графа (рис. 5, б) КА волны b_i' можно определить как

$$b_i' = \frac{a_j}{1 - \Gamma_{H1}\Gamma_{H2}}, \quad i, j=1, 2, i \neq j. \quad (17)$$

Подставив (17) в (16), а затем разделив (15) на результат подстановки, найдем измеренный ККП:

$$T_{ij} = \frac{b_i}{a_j} = \frac{\rho_{iq}}{\rho'_{iq}(1 - \Gamma_{H1}\Gamma_{H2})}, \quad i, j=1, 2, i \neq j,$$

где ККО Γ_{Hj} определены с учетом (14).

Установим взаимосвязь измеренных ККО Γ_i и ККП T_{ij} с S-параметрами АК и ранее измеренными его нагрузочными ККО Γ_{Hj} .

Волны возбуждений a_i' и b_i' в плоскостях $i-i$ входа ($i, j=1$) и выхода ($i, j=2$) АК связаны между собой через его S-параметры выражениями $b_i' = S_{ii}a_i' + S_{ij}a_j'$, $i, j=1, 2, i \neq j$, откуда ККО Γ_i на его входе и выходе можно определить как

$$\Gamma_i = S_{ii} + S_{ij} \frac{a_j'}{a_i'} \Big|_{a_i \neq 0, a_j = 0, i, j=1, 2, i \neq j}. \quad (18)$$

Волну возбуждения a_j' (18) в плоскости $j-j$ входа АК ($j=2$) определим из сигнального графа (рис. 5, б) в виде

$$a_j' = a_i' \frac{S_{ji}\Gamma_{Hj}}{1 - S_{jj}\Gamma_{Hj}} \Big|_{a_i \neq 0, a_j = 0, i, j=1, 2, i \neq j},$$

откуда

$$\frac{a_j'}{a_i'} = \frac{S_{ji}\Gamma_{Hj}}{1 - S_{jj}\Gamma_{Hj}} \Big|_{a_i \neq 0, a_j = 0, i, j=1, 2, i \neq j}. \quad (19)$$

Подстановка (19) в (18) дает

$$\Gamma_i = S_{ii} + \frac{S_{ij}S_{ji}\Gamma_{nj}}{1 - S_{jj}\Gamma_{nj}} \Big|_{a_i \neq 0, a_j = 0, i, j = 1, 2, i \neq j.} \quad (20)$$

Применив к сигнальному графу (рис. 5, а) правило некасающихся контуров [1], определим ККП T_{ij} нагруженного АК:

$$T_{ij} = S_{ij}/\Delta, \quad i, j = 1, 2, i \neq j, \quad (21)$$

где определитель

$$\Delta = (1 - S_{11}\Gamma_{n1})(1 - S_{22}\Gamma_{n2}) - S_{12}S_{21}\Gamma_{n1}\Gamma_{n2}. \quad (22)$$

Вынося поочередно первые два члена $(1 - S_{11}\Gamma_{n1})$ и $(1 - S_{22}\Gamma_{n2})$ (22) с подстановкой (20), получим другой вид определителя:

$$\begin{aligned} \Delta &= (1 - S_{11}\Gamma_{n1})(1 - \Gamma_2\Gamma_{n2}) = \\ &= (1 - S_{22}\Gamma_{n2})(1 - \Gamma_1\Gamma_{n1}). \end{aligned} \quad (23)$$

Из равенства представлений Δ (23) найдем:

$$S_{22} = S_{11}c_1 + c_2, \quad (24)$$

где

$$c_1 = \frac{\Gamma_{n1}(1 - \Gamma_2\Gamma_{n2})}{\Gamma_{n2}(1 - \Gamma_1\Gamma_{n1})}, \quad c_2 = \frac{\Gamma_2\Gamma_{n2} - \Gamma_1\Gamma_{n1}}{\Gamma_{n2}(1 - \Gamma_1\Gamma_{n1})}.$$

Подстановка (24) в (20) при $i, j = 1, 2, i \neq j$ с исключением произведения $S_{12}S_{21}$ дает

$$S_{11} = [\Gamma_{n2}(\Gamma_2 - c_2) - \Gamma_{n1}\Gamma_1(1 + c_2\Gamma_{n2})]/D, \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} D &= \Gamma_{n2}[c_1 + \Gamma_{n1}(\Gamma_2 + c_2)] - \\ &- \Gamma_{n1}[1 + \Gamma_{n2}(c_1\Gamma_1 + c_2)]. \end{aligned}$$

Из (21) при $i, j = 1, 2, i \neq j$ имеем:

$$S_{12} = T_{12}\Delta; \quad S_{21} = T_{21}\Delta. \quad (26)$$

Таким образом, выражения (24)–(26) устанавливают связь измеренных ККО Γ_i , Γ_{nj} и ККП T_{ij} с S -параметрами нагруженного АК в коаксиальном тракте.

С учетом R_i -параметров (13) S -параметры (24)–(26) АК в коаксиальном тракте можно представить в виде каскадного соединения $S = f(R_1, S', R_2)$. Тогда S' -параметры АК в микрополосковом тракте можно определить из выражений [6]

$$\begin{cases} S'_{11} = [R_{112}(R_{111}S_{22} - \Delta_S) + \\ \quad + (S_{11} - R_{111})\Delta_{R2}]/\Delta; \\ S'_{12} = -R_{211}R_{212}S_{12}/\Delta; \\ S'_{21} = -R_{121}R_{122}S_{21}/\Delta; \\ S'_{22} = [R_{221}(R_{222}S_{11} - \Delta_S) + \\ \quad + (S_{22} - R_{222})\Delta_{R1}]/\Delta, \end{cases} \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_S &= S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}; \\ \Delta_{R2} &= R_{112}R_{222} - R_{122}R_{212}; \\ \Delta &= R_{112}(S_{22}\Delta_{R1} - R_{221}\Delta_S) + \\ &\quad + (R_{221}S_{11} - \Delta_{R1})\Delta_{R2}; \\ \Delta_{R1} &= R_{111}R_{221} - R_{121}R_{211}. \end{aligned}$$

Здесь последний индекс при R_i -параметрах определяет их принадлежность к входу ($i = 1$) или выходу ($i = 2$).

Выражения (27) обеспечивают перенос результатов калибровки анализатора коаксиальными мерами на измерение S -параметров АК, предназначенных для включения в МПЛ. Для S -параметров коаксиальных узлов $S' = S$.

В таблице приведено содержание теста зондирующих a_i и опорных a_i^0 сигналов при измерении ККО Γ_i и ККП T_{ij} АК в режиме усиления и генерации.

Сигнал	Режим усиления			
	Γ_1	Γ_2	T_{12}	T_{21}
Непрерывный, модулированный	a_1, a_1^0	a_2, a_2^0	a_1, a_2, a_1^0	a_1, a_2^0
Сигнал	Режим генерации			
	Γ_1	Γ_2	T_{12}	T_{21}
Модулированный	a_1, a_1^0	a_2, a_2^0	a_2, a_1^0	a_1, a_2^0

Режим усиления АК задается входным непрерывным зондирующим сигналом a_1 . При этом измерение ККО Γ_2 и ККП T_{12} АК осуществляется методом выделения амплитудно-модулированных зондирующих и опорных сигналов a_2, a_2^0 и a_2, a_1^0 , что обеспечивает их селекцию от входного непрерывного зондирующего сигнала a_1 . В режиме генерации измерение всех ККО Γ_i и ККП T_{ij} АК осуществляется методом выделения амплитудно-модулированных зондирующих и опорных сигналов a_i и a_i^0 , что обеспечивает их селекцию от собственного выходного сигнала АК b_2 . Амплитуда зондирующего сигнала a_2 в ре-

жиме усиления и амплитуды зондирующих сигналов a_1 и a_2 в режиме генерации выбираются из условия их минимального влияния на эти режимы.

Таким образом, предложен принцип построения ИА, обеспечивающего имитационное моделирование усилителей и автогенераторов в коаксиальном тракте в соответствии с их ТЗ с последующим измерением нагрузочных ККО Γ_{Hj} их АК в его реальном режиме работы для непосредственного проектирования этих устройств в микрополосковом исполнении. Такое адекватное измерение нагрузочных ККО Γ_{Hj} обеспечивает повышение экономической эффективности САПР этих устройств, поскольку позволяет сократить цикл опытно-конструкторских работ (ОКР) в 2–3 раза за счет исключения необходимости многократной

технологической коррекции опытного образца этих устройств. Сформирована математическая модель ИА, а также математическая модель его калибровки. Рассмотрен метод анализа устойчивости АК в пространстве его нагрузочных ККО Γ_{Hj} , облегчающий выбор ККО АК для последующего проектирования усилителей и автогенераторов,

Дополнительно рассмотрена возможность использования ИА для измерения ККО Γ_i на входе и выходе нагруженного АК, а также измерения его ККП T_{ij} , которые совместно с его измеренными нагрузочными ККО Γ_{Hj} позволяют по предложенной методике определить S -параметры этого компонента, которые он имел бы при включении в микрополосковую линию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупроводниковые входные устройства СВЧ: в 2 т. / под ред. В. С. Эткина. М.: Сов. радио, 1975. Т. 1. 344 с.
2. Савелькаев С. В., Заржецкая Н. В. Расчет и проектирование автогенераторов СВЧ в пространстве S -параметров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2016. Вып. 1. С. 30–37.
3. Савелькаев С. В. Двухсигнальный метод измерения S -параметров активных СВЧ-цепей в режиме большого сигнала // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. 1991. Вып. 5(439). С. 30–32.
4. Савелькаев С. В. Методы анализа устойчивости активных СВЧ-цепей и измерения их S -параметров // Метрология. 2005. № 4. С. 19–28.

Статья поступила в редакцию 16 ноября 2016 г.

Для цитирования: Теоретические основы построения имитатора-анализатора усилителей и автогенераторов СВЧ / С. В. Савелькаев, С. В. Ромасько, В. А. Литовченко, Н. В. Заржецкая // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 1. С. 63–74.

Савелькаев Сергей Викторович – д. т. и. (2007), доцент (2013), профессор кафедры специальных устройств и технологий Сибирского государственного университета геосистем и технологий (г. Новосибирск). Автор 90 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; радиотехнические измерения; механика. E-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

Ромасько Светлана Владимировна – аспирантка и ассистент кафедры метрологии и технологии оптического производства Сибирской государственной геодезической академии (г. Новосибирск). Инженер-метролог (2009, Сибирская государственная геодезическая академия). Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – метрология и метрологическое обеспечение радиотехнических измерений; методы и средства измерения параметров активных компонентов усилителей и автогенераторов СВЧ с использованием имитаторов-анализаторов. E-mail: s_romasko@mail.ru

Литовченко Владимир Анатольевич – менеджер по управлению персоналом (2009, Московское высшее военное командное училище), начальник учебной лаборатории кафедры разведки и воздушной десантной подготовки Новосибирского высшего военного командного училища, аспирант кафедры метрологии и технологии оптического производства Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Автор 16 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехнические измерения; проектирование и анализ СВЧ-устройств. E-mail: litovchickenko.vladimir@mail.ru

Заржецкая Наталья Викторовна – инженер-системотехник (1988, Новосибирский электротехнический институт), старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий, аспирант кафедры метрологии и технологии оптического производства Сибирского государственного университета геосистем и технологий (г. Новосибирск). Автор 18 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехнические измерения; системы автоматического управления. E-mail: zarjetskaya@yandex.ru

S. V. Savelkaev, S. V. Romasko, V. A. Litovchenko, N. V. Zarzhetskaya
Siberian State University of Geosystems and Technology (Novosibirsk)

Theoretical basis of simulator-analyzer building-up for microwave amplifiers and oscillators

Abstract. The construction principle of simulator-analyzer is proposed providing simulation modeling of amplifiers and oscillators in coaxial microwave measurement chain according to their technical specifications, followed by measurement of complex load reflection coefficients of the active component of the devices for their further development in microstrip design. Mathematic model of simulator-analyzer as well as mathematic model of its calibration is presented. Analysis method of active component stability in the area of its complex load reflection coefficients is considered that facilitates the choice of the loads and the most active component in simulation of amplifiers and oscillators. In addition, the possibility of using the simulator-analyzer for measuring complex reflection coefficients at the input and the output of the loaded active component is described, as well as measurement of its complex transmission coefficients which together with the measured complex load reflection coefficients allow to determine S-parameters of the analyzed component it will have when included in a micro strip line.

Key words: Simulator, Analyzer, Mathematic Model, Calibration, Complex Reflection Coefficient and Transmission, Analysis method of active component stability, Method of S-Parameters Determining, Method of Transfer of the Measurement Results from the Coaxial Line to the Micro Strip

REFERENCES

1. Etkina V. S. *Poluprovodnicovye vkhodnye ustroystva* [UHF Semiconductor Input Devices]. Moscow, Sov. radio Publ. 1975, vol. 1, 344 p. (In Russian)
2. Savelkaev S. V., Zarzhetskaja N. V. Calculation and Design of UHF Oscillators in the Space of S-Parameters. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*. 2016, no. 1, pp. 30–37. (In Russian)
3. Savelkaev S. V. Two signal method of measuring of S-parameters of active UHF circuits in large-signal mode. *Electronnaja tehnika. Ser. Elektronika SVCH*. 1991, no. 5(439), pp. 30–32. (In Russian)
4. Savelkaev S. V. Methods of stability analysis of active UHF circuits and measure their S-parameters. *Metrologiya*. 2005, no. 4, pp. 19–28. (In Russian)
5. Savelkaev S. V. Koaksialnoe kontaktnoe ustroystvo [Coaxial contact device]. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2005, no. 5, pp. 65–68. (In Russian)
6. Savelkaev S. V. *Sposob kalibrovki koaksialnogo kontaktnogo ustroystva* [A method of calibrating of the coaxial contact device]. Pat. SU, no. 1774286, 1992. (In Russian)
7. Savelkaev S. V. Theoretical basics of building of two signals UHF circuits analyzers. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2005, no. 3, pp. 41–46. (In Russian)
8. Savelkaev S. V. A variation method of estimating the total error of measurement of the UHF circuits analyzers. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2008, no. 12, pp. 43–46. (In Russian)

Received November, 16, 2016.

For citation: Savelkaev S. V., Romasko S. V., Litovchenko V. A., Zarzhetskaja N. V. Theoretical basis of simulator-analyzer building-up for microwave amplifiers and oscillators. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*. [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 1, pp. 63–74. (In Russian)

Sergey V. Savelkaev – D.Sc. in engineering (2007), Associate Professor (2013), professor of the Department of Special Devices and Technologies of Siberian State University of Geosystems and Technologies (Novosibirsk). The author of 90 scientific publications Area of expertise: radio equipment; radio measurement; mechanics.
E-mail: sergei.savelkaev@yandex.ru

Svetlana V. Romasko – Dipl.-engineer on metrology (2009, Siberian State Geology Academy), post graduate student and teaching assistant of the Department of Metrology and Optics Engineering of named academy (t. of Novosibirsk). The author of 20 scientific publications. Area of expertise: metrology and metrological support of radio engineering measurements; methods and means of measurement of parameters of the active components amplifiers and oscillators microwave using simulators analyzers.
E-mail: s_romasko@mail.ru

Vladimir A. Litovchenko – Manager on human resources (2009, the Moscow Higher Military Command School), Chief of the Laboratory of the Department of Intelligence and Airborne Training of the Novosibirsk Higher Military Command School, post graduate student of the Department of Optics Engineering of Siberian State University of Geosystems and Technologies. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: radio measurement; design and analysis of UHF devices.
E-mail: litovchienko.vladimir@mail.ru

Natalya V Zarzhetskaya – System Engineer (1988, Novosibirsk Electrotechnical Institute), Senior Tutor of the Department of Special Devices and Technologies, post graduate student of the Department of Metrology and Technologies of Optical Production of Siberian State University of Geosystems and Technologies (t. of Novosibirsk). The author of 18 scientific publications. Area of expertise: electronic measurement, automatic control systems.
E-mail: zarzhetskaya@yandex.ru