

Ю. Б. Гимпилевич

## ВСТРОЕННЫЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА СВЧ ТРАКТОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Повышение надежности функционирования радиотехнических систем требует создания средств встроенного контроля и диагностики СВЧ трактов этих систем. Особую актуальность приобретает эта задача при эксплуатации космических систем связи, необслуживаемых космических аппаратов, авиационной техники и других подвижных объектов.

Выпускаемая промышленностью стандартная измерительная аппаратура (приборы групп Р1 - Р5) не может быть использована для встроенного контроля, поскольку принципы построения этой аппаратуры и методика измерения не удовлетворяют специфическим требованиям встроенного контроля.

### ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРИБОРАМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ

Особенности встроенного контроля накладывают на измерительную СВЧ аппаратуру целый ряд специфических требований, выполнение которых не является обязательным для приборов общего назначения, используемых в лабораторных условиях. Основные требования.

1. Для решения задач контроля и диагностики встроенные приборы обеспечивают совокупные измерения комплексных параметров следующих функциональных частей тракта: активного двухполюсника (генераторный блок); пассивных двухполюсников (антенный блок, отдельные сечения тракта); четырехполюсников (фидерная часть, отдельные ее узлы).

2. Измерения осуществляются в режиме штатного функционирования радиотехнической системы на реальном уровне мощности и рабочих частотах (функциональный контроль). Кроме того, должна быть предусмотрена возможность использования во

---

335053, Севастополь, студгородок,  
Приборостроительный институт

встроенных приборах одного из видов стандартного зондирующего сигнала (тестовый контроль).

3. Измерительная процедура обеспечивает высокую достоверность контроля при достаточной оперативности.

4. Габариты и масса встраиваемых СВЧ преобразователей устройств вторичной обработки информации должны быть минимальными.

5. Принципы построения приборов, а также методика измерений исключают разборку, перестыковку, топологические изменения в СВЧ тракте.

6. Мощность, отдаваемая из СВЧ тракта СВЧ преобразователем для измерительных целей, минимальна, т. е. эти преобразователи должны быть проходного типа.

7. Процедура измерений ориентирована на протяженные тракты.

8. Встроенные приборы обладают высокой стабильностью метрологических характеристик при воздействии на измерительный канал дестабилизирующих факторов.

9. Обработка измерительной информации сопровождается подавлением шумов и наводок, воздействующих на измерительный канал.

10. Принципы построения приборов обеспечивают высокий уровень автоматизации процесса измерений, позволяющего решать задачи в условиях полной автономности без участия оператора.

#### КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВЧ ТРАКТА

Оценка работоспособности тракта в целом должна осуществляться на основе определения некоторого обобщенного параметра, либо системы параметров и наложении на них ограничений.

Важнейшей обобщенной характеристикой СВЧ тракта как системы, предназначенной для канализации энергии от генератора к нагрузке, следует считать коэффициент полезного действия (КПД). Разобьем тракт на три условные части: генераторный блок, антенный блок и фидерную часть. При таком разделении для КПД тракта может быть получена расчетная формула

$$\eta = \frac{|\dot{S}_{21}|^2 (1 - |\dot{\Gamma}|^2)}{|1 - \dot{\Gamma}_r \dot{S}_{11} - \dot{\Gamma}_s \dot{S}_{22} - \dot{\Gamma}_r \dot{\Gamma}_s \dot{S}_{21} \dot{S}_{12} + \dot{\Gamma}_r \dot{\Gamma}_s \dot{S}_{11} \dot{S}_{22}|^2}, \quad (1)$$

где  $\dot{\Gamma}$ ,  $\dot{\Gamma}_r$  - комплексные коэффициенты отражения нагрузки и генератора соответственно;  $S_{mr}$  - комплексные элементы матрицы рассеяния обобщенного четырехполюсника, в виде которого представлена фидерная часть.

В качестве комплексного критерия исправной работы прием неравенство

$$\eta > \eta_m, \quad (2)$$

где  $\eta_m$  - минимально-допустимое значение КПД

Существенно упростить процедуру тестирования состояния тракта позволяет оценка на основе модулей измеряемых параметров (модульная оценка). Соотношение (1) позволяет определить минимальное  $\eta'$  и максимальное значение  $\eta''$  КПД, опираясь лишь на значение модулей выше перечисленных параметров. При этом исправное состояние тракта будет соответствовать выполнению неравенства

$$\eta' > \eta_m, \quad (3)$$

а неисправное

$$\eta'' < \eta_m. \quad (4)$$

Если же  $\eta' \leq \eta \leq \eta''$ , то возникает неопределенность и следует пользоваться либо вероятностной оценкой, либо переходить к комплексной.

Дальнейшее упрощение модульной оценки работоспособности может быть достигнута путем использования априорной информации о параметрах настроенного тракта. Используя условия настройки, получим неравенство, характеризующее исправную работу

$$2\eta_{cp} - \eta_0 > \eta_m, \quad (5)$$

где  $\rho_{cp} = (\rho' + \rho'')/2 \approx |\dot{S}_{21}|^2 (1 - |\dot{\Gamma}|^2)$ ;  $\rho_0 = |\dot{S}_{21}^0|^2$   
 $|\dot{S}_{21}^0|$  - априорно-известное значение коэффициента  $|\dot{S}_{21}|$ , достигнутое при настройке.

На основе рассмотренных критериев разработан алгоритм процедуры контроля работоспособности СВЧ тракта, заключающийся в последовательном применении критериев от простого к сложному

При конкретном проектировании оценка по КПД должна дополняться другими важными для данного случая оценками. В докладе рассматриваются варианты систем неравенств, гарантирующих оценку работоспособности для различных случаев.

Диагностика неисправных узлов тракта возможна лишь при измерении полной системы комплексных параметров, характеризующих данный функциональный узел и наложении на их модули и аргументы соответствующих ограничений.

#### УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ ВСТРОЕННЫХ ПРИБОРОВ

Повышение достоверности контроля при достаточно высокой оперативности контроля может быть достигнута путем управления точностью встроенных приборов. Иерархия многоуровневой системы контроля такова, что с повышением уровня точности увеличивается время измерения (это связано с переходом от простых аналоговых алгоритмов обработки к более сложным - цифровым).

Вероятность ложного отказа в многоуровневой системе контроля с управлением точностью измерений может быть представлена в виде

$$P_{10} = \int_{x_1}^{\rho_0} n(\rho) \left[ \int_{-\infty}^{\rho_m} n_1(x) dx \right] d\rho + \int_{x_2}^{x_1} n(\rho) \left[ \int_{-\infty}^{\rho_m} n_2(x) dx \right] d\rho + \dots$$

$$\dots + \int_{\rho_m}^{x_{n-1}} n(\rho) \left[ \int_{-\infty}^{\rho_m} n_{n-1}(x) dx \right] d\rho, \quad (5)$$

где  $n(\rho)$  - закон распределения контролируемого параметра  
 $n_i(x)$  - закон распределения результатов измерения на  $i$ -ом уровне;  $n$  - количество уровней. В докладе дан детальный

анализ двухуровневой системы контроля. Проведено для этого случайное интегрирование соотношения (6) для различных вариантов. Выявлены условия, при которых обеспечивается повышение достоверности контроля не менее чем на порядок по отношению к одноуровневой системе контроля пониженной точности. При этом основную часть времени активного функционирования осуществляются измерения при пониженном уровне точности.

#### РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СВЧ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОММУТАЦИОННОГО ТИПА

Анализ показывает, что наиболее полно удовлетворяют требованиям, сформулированным в начале статьи, поляризационный, интерференционный и метод калибруемого многополюсника. Однако известные типы СВЧ преобразователей, построенные на базе этих методов, не обладают достаточной стабильностью и точностью измерения. Достижение высоких метрологических характеристик возможно реализацией коммутационного принципа, который заключается в применении единого преобразовательного элемента. Обобщенная структура встроенного коммутационного СВЧ преобразователя представлена в виде шестиполюсника с переменными параметрами. Сигнал, снимаемый с детекторного датчика на  $i$ -ом шаге коммутации, имеет вид

$$P_i = g_i E_{r_i}^2 \left| \frac{1 + A_i \Gamma}{1 + B_i \Gamma + C_i \Gamma^2 + D_i \Gamma^3} \right|^2, \quad (7)$$

где  $g_i$  - скалярная константа;  $B_i, C_i, D_i$  - комплексные константы, характеризующие шестиполюсное устройство на  $i$ -ом шаге коммутации.

Получены формулы, связывающие указанные константы с параметрами шестиполюсника.

Максимальное число стационарных состояний измерительно-го шестиполюсника  $N$  определяется по формуле

$$N = n + \frac{(n-1)n}{2!} + \frac{(n-2)(n-1)n}{3!} + \dots + 1.$$

где  $n$  - число выходов амплитудно-фазового преобразователя.

Так при  $n = 4$  имеем  $N = 15$ . То есть появляется возможность создания существенной избыточности, которая позволяет повысить точность обработки результатов измерения.

Решение системы уравнений (7) относительно  $\Gamma, \Gamma_r$  позволяет осуществить совокупное измерение исконых параметров. Возможные варианты решений рассмотрены ниже.

#### ИЗМЕРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ВОЗБУЖДЕННОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ СЕКЦИИ

Метод измерения основан на том, что с помощью специального устройства в тракте задаются различные вариации коэффициента отражения  $\Gamma$ . При этом система уравнений (7) может быть решена относительно  $\Gamma_r$ . Пусть таких вариаций создано  $L$ . Тогда, пронормировав на  $i$ -ом шаге коммутации все выходные напряжения к напряжению при  $j = L$ , получим

$$\frac{P_{i,j}}{P_{i,L}} = \left| \frac{1 + A_i \Gamma_j}{1 + A_i \Gamma_L} \right|^2 \left| \frac{1 + B_i \Gamma_r + C_i \Gamma_L + D_i \Gamma_r \Gamma_L}{1 + B_i \Gamma_r + C_i \Gamma_j + D_i \Gamma_r \Gamma_j} \right|, \quad (8)$$

Путем преобразований систему уравнений (8) можно представить в виде

$$Q_{i,j} = R_{i,j} |\Gamma_r|^2 + S_{i,j} X + T_{i,j} Y + \delta_{i,j}, \quad (9)$$

где  $R_{i,j}, S_{i,j}, T_{i,j}$  - коэффициенты, являющиеся функциями  $B, C, D, P_{i,j}/P_{i,L}$ . Значения этих коэффициентов получены в явном виде;  $\delta_{i,j}$  - невязки, вызванные погрешностью измерения;  $X = R_r |\Gamma_r|$ ;  $Y = I_m \Gamma_r$ .

Система (9) является линейной относительно действительной и мнимой частей  $\Gamma_r$  и может быть решена методом наименьших квадратов при избыточности по  $j$  для каждого  $i$ . В результате могут быть определены  $|\Gamma_{ri}|$  и  $\varphi_{ri}$  на каждом шаге коммутации

$$|\Gamma_{ri}| = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}; \quad (10)$$

$$\varphi_{ri} = \arctg Y_i / X_i. \quad (11)$$

За истинные значения очевидно следует взять средние значения, усреднив (10) и (11) по числу шагов коммутации.

## ИЗМЕРЕНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛУСНИКА

Задачу измерения S-параметров четырехполусника удается свести к задаче измерения комплексного коэффициента отражения. При этом с помощью специального устройства в выходной плоскости четырехполусника задаются вариации коэффициента отражения  $\Gamma_{2j}$  и осуществляется измерение его во входной плоскости  $\Gamma_{1j}$ . Система измерительных уравнений при этом имеет вид

$$\dot{\Gamma}_{1j} = \dot{S}_{11} + \dot{S}_{22} \dot{\Gamma}_{2j} \dot{\Gamma}_{1j} - d \dot{\Gamma}_{2j} + \dot{\delta}_j. \quad (12)$$

При  $j > 3$  - эта линейная система решается методом наименьших квадратов. В результате определяем  $\dot{S}_{11}$ ,  $\dot{S}_{22}$  и  $d = \dot{S}_{11} \dot{S}_{22} - \dot{S}_{21} \dot{S}_{12}$ . Для взаимного четырехполусника определим  $\dot{S}_{21}$

$$\dot{S}_{21} = \sqrt{|\dot{S}_{11} \dot{S}_{22} - d|} \exp\left[-\frac{1}{2} \arg(\dot{S}_{11} \dot{S}_{22} - d)\right]. \quad (13)$$

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Из предыдущего следует, что все требуемые параметры определяются через измеренные значения комплексного коэффициента отражения (ККО). Поэтому существенное значение приобретают методы высокостабильного и высокоточного измерения ККО.

В докладе рассмотрены два новых метода измерения ККО: спектральный и фазометрический.

### Спектральный метод измерения

Этот метод основан на анализе спектра выходного сигнала (ПМ) преобразователя при периодической поочередной коммутации каналов амплитудно-фазового преобразователя. Доказывается возможность измерения путем фильтрации составляющих спектра и определения их амплитуд и начальных фаз. Приводятся разработанные схемы измерителей, основанных на этом методе. Значительное внимание уделено коррекции мультипликативной составляющей погрешности.

### Фазометрический метод измерения

Этот метод основан на анализе фазового распределения

поля в волноводе. Проведен теоретический анализ и показана возможность получения измерительной информации путем измерения начальной фазы сигналов, снимаемых с выходов амплитудно-фазового преобразователя. Оценены погрешности измерений и показано, что динамический диапазон мощностей, в котором возможны измерения составляет порядок 60 дБ. Разработаны схемы измерений с опорным каналом, без опорного канала, автоматического измерителя.

### ВСТРОЕННЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ СВЧ ЦЕПЕЙ

Встроенные приборы второго уровня точности, в которых реализуются цифровые алгоритмы обработки измерительной информации по существу представляют собой анализаторы цепей. В качестве вычислительного устройства в таких анализаторах могут быть использованы бортовые ЗЕМ, центральные системные ЗЕМ, а также встроенные вычислительные средства. Получение высшей точности в условиях встроенного контроля затруднено высоким уровнем помех, что объясняется сложной электромагнитной обстановкой при эксплуатации радиотехнических систем. В связи с этим разработан помехоустойчивый алгоритм обработки измерительной информации. Он основан на формировании дискретных последовательностей путем перестановок во времени отсчетов выходных сигналов преобразователя, применением ДПФ к этим последовательностям. В результате ДПФ определяют аргументы коэффициентов разложения и по ним рассчитывают реальную и мнимую составляющие ККО по формулам

$$X = \frac{U_0 + U_1 M_1 + U_2 M_2 + U_3 M_3 + U_4 M_1 M_2 + U_5 M_1 M_3 + U_6 M_2 M_3 + U_7 M_1 M_2 M_3}{1 + C_1 M_1 + C_2 M_2 + C_3 M_3 + C_4 M_1 M_2 + C_5 M_1 M_3 + C_6 M_2 M_3 + C_7 M_1 M_2 M_3}, \quad (14)$$

$$Y = \frac{V_0 + V_1 M_1 + V_2 M_2 + V_3 M_3 + V_4 M_1 M_2 + V_5 M_1 M_3 + V_6 M_2 M_3 + V_7 M_1 M_2 M_3}{1 + C_1 M_1 + C_2 M_2 + C_3 M_3 + C_4 M_1 M_2 + C_5 M_1 M_3 + C_6 M_2 M_3 + C_7 M_1 M_2 M_3}, \quad (15)$$

В докладе обсуждаются вопросы калибровки встроенных анализаторов СВЧ цепей. В общем случае задача калибровки сводится к решению нелинейной системы уравнения, которое осуществляется оптимальным итерационным методом Ньютона-Рафсона.



Предложен новый способ калибровки, исключая применение итерационной процедуры. Метод основан на сведении нелинейной системы к линейной. В два этапа удается решить задачу определения параметров.

#### ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Все описанные структуры и алгоритмы реализованы на практике. Создан ряд приборов аналогового типа, позволяющие с высокой стабильностью и погрешностями по модулю  $\pm 10\%$ , по фазе  $\pm 5^\circ$  измерять параметры СВЧ трактов в широком диапазоне внешних воздействий (температура, вибрация, радиация и пр.). Приборы предназначены для применения в трактах, выполненных на прямоугольном и коаксиальном волноводах различного сечения. Блок обработки информации унифицирован и основан на спектральном принципе измерения.

Созданы несколько вариантов измерительных систем (анализаторов цепей), обладающих высокой точностью измерения; порядка  $1\%$  по модулю и  $1^\circ$  по фазе. В системах реализованы описанные алгоритмы обработки информации и калибровки. Обеспечивается панорамное измерение модуля и фазы с отображением на осциллографическом и цифровом индикаторах. Приводится материал по сравнению результатов калибровки при использовании итерационной и линейной процедур. Сравнение показывает, что точности калибровки практически одинаковы.