

У ДК 621.317.742

**КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
МИКРОВОЛНОВЫХ ТРАКТОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
Гимпилевич Ю.Б.**

Севастопольский национальный технический университет,

Студгородок г Севастополь, Украина, 98053

E-mail: gimpil@mail.ru

Исследованы полный, модульный и упрощенный модульный критерии оценки технического состояния микроволнового тракта. В качестве обобщенного параметра, который характеризует СВЧ тракт в целом, выбран коэффициент полезного действия. Приводится алгоритм контроля технического состояния тракта на основе разработанных критериев.

Проблема встроенного контроля параметров микроволновых трактов радиотехнических систем является одной из наименее изученных и сложных в плане идеологии контроля и технической реализации [1]. Одной из задач, решение которой существенно влияет на идеологию построения системы контроля, является определение критериев оценки технического состояния тракта.

На рисунке 1 изображена укрупненная структурная схема

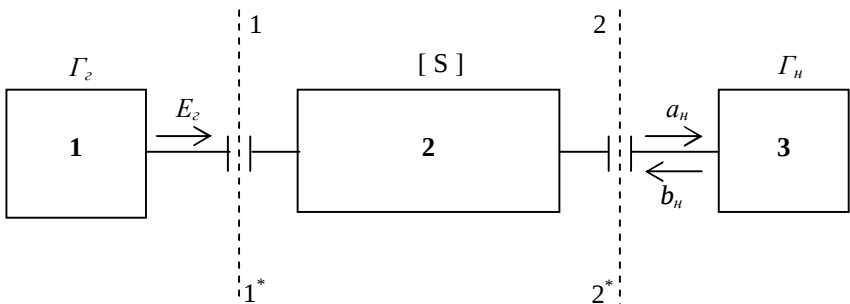


Рисунок 1 – Укрупненная структурная схема одноствольного участка СВЧ тракта радиотехнической системы:

одноствольного участка СВЧ тракта. Тракт условно разбит на три основные части: генераторный блок 1; фидерную часть 2; антенный блок 3. Под фидерной частью будем понимать всю совокупность узлов, включенных между генераторным и антенным блоками (фильтры, изгибы, скрутки, трансформаторы сопротивлений, переходы и т.д.). Количество этих узлов может составлять от единиц до нескольких десятков, а протяженность фидерной части – от единиц до десятков метров.

Оценка работоспособности тракта должна осуществляться на основе определения некоторого обобщенного параметра, либо системы параметров, характеризующих тракт в целом. Специфика волновых процессов заключается в том, что для тракта как для объекта в целом, не может быть найден простой и единственный параметр, измерение которого позволило бы судить о работоспособности тракта. Это связано с комплексным характером параметров СВЧ узлов, сложным влиянием этих параметров на характер распределения поля в тракте.

Важнейшей обобщенной характеристикой СВЧ тракта как системы, предназначенной для канализации энергии от генератора к нагрузке, следует считать коэффициент полезного действия (КПД). КПД тракта η определяется отношением мощности, поступающей в нагрузку P_n , к мощности, вырабатываемой генератором P_e

$$\eta = \frac{P_n}{P_e} = \frac{|a_n|^2 - |b_n|^2}{|E_e|^2}, \quad (1)$$

где a_n , b_n – комплексные нормированные амплитуды падающей и отраженной волн на нагрузке соответственно; E_e – комплексная нормированная амплитуда волны, возбуждаемой генераторным блоком.

В соответствии с [2] волна, падающая на нагрузку, может быть записана в виде

$$a_n = \frac{E_e S_{21}}{1 - \Gamma_e S_{11} - \Gamma_n S_{22} - \Gamma_e \Gamma_n S_{21} S_{12} + \Gamma_e \Gamma_n S_{11}^2}, \quad (2)$$

где Γ_n – комплексный коэффициент отражения нагрузки; Γ_e – комплексный коэффициент отражения со стороны генератора; S_{mn} – комплексные элементы матрицы рассеяния обобщенного четырехполюсника в виде которого представлена фидерная часть.

С учетом граничных условий в плоскости подключения нагрузки отраженная волна может быть представлена как

$$b_n = a_n \Gamma_n = \frac{E_e S_{21} \Gamma_n}{1 - \Gamma_e S_{11} - \Gamma_n S_{22} - \Gamma_e \Gamma_n S_{21} S_{12} + \Gamma_e \Gamma_n S_{11}^2}. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1) получаем

$$\eta = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_n|^2)}{|1 - \Gamma_e S_{11} - \Gamma_n S_{22} - \Gamma_e \Gamma_n S_{21} S_{12} + \Gamma_e \Gamma_n S_{11}^2|^2}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что КПД тракта зависит от комплексных элементов матрицы рассеяния фидерной части S_{mn} , от комплексных коэффициентов отражения генератора Γ_e и нагрузки Γ_n . В процессе эксплуатации деградация этих параметров может привести к существенному уменьшению КПД тракта и выходу его за пределы поля допуска, что будет свидетельствовать о выходе тракта из строя.

В качестве комплексного критерия исправной работы примем следующее неравенство

$$\eta > \eta_m, \quad (5)$$

где η_m – минимально-допустимое значение КПД.

Если неравенство (5) не выполняется, то следует считать, что тракт неисправен, и необходимо приступить к диагностике, т.е. локализации неисправных узлов. Комплексная оценка (5) достаточно сложна, так как требует измерения в общем случае шести комплексных параметров.

Существенно упростить процедуру позволит оценка на основе модулей измеряемых параметров (модульная оценка). Изменение аргументов комплексных параметров Γ_n , Γ_e , S_{mn} при постоянстве их модулей приводит к изменениям КПД тракта в некоторых пределах от η_1 до η_2 (зона неопределенности). Используя (4), определим предельно возможные значения

$$\eta_1 = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_n|^2)}{\left(1 + |\Gamma_e S_{11}| + |\Gamma_n S_{22}| + |\Gamma_e \Gamma_n S_{21} S_{12}| + |\Gamma_e \Gamma_n S_{11}^2|\right)^2}; \quad (6)$$

$$\eta_2 = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_n|^2)}{\left(1 - |\Gamma_e S_{11}| - |\Gamma_n S_{22}| - |\Gamma_e \Gamma_n S_{21} S_{12}| - |\Gamma_e \Gamma_n S_{11}^2|\right)^2}, \quad (7)$$

где η_1 – минимальное значение КПД; η_2 – максимальное значение КПД.

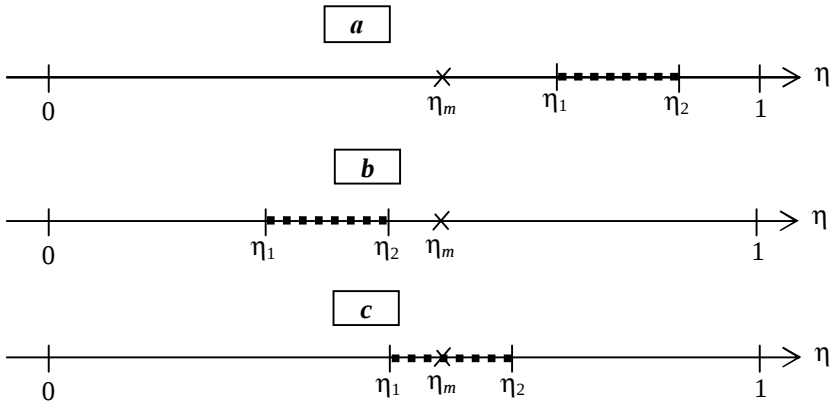


Рисунок 2– Модульная оценка работоспособности СВЧ тракта:

При этом оценка работоспособности сводится к трем случаям. Первый случай иллюстрируется диаграммой *a* на рисунке 2. Эта ситуация соответствует исправному тракту и характеризуется неравенством

$$\eta_1 > \eta_m. \quad (8)$$

Из диаграммы *a* видно, что выполнение неравенства (8) заведомо обеспечивает выполнение условия (5) при любом значении η , находящемся в интервале $\eta_1 \leq \eta \leq \eta_2$. Второй случай иллюстрируется диаграммой *b* на рисунке 2. Эта ситуация соответствует неисправному тракту и характеризуется неравенством

$$\eta_2 < \eta_m. \quad (9)$$

Из диаграммы *b* видно, что выполнение неравенства (9) автоматически обеспечивает условие неисправности тракта ($\eta < \eta_m$) для любого возможного значения КПД.

Третий случай иллюстрируется диаграммой *c* на рисунке 2. Эта ситуация соответствует неопределенному состоянию и характеризуется неравенством

$$\eta_1 \leq \eta_m \leq \eta_2. \quad (10)$$

При этом невозможно достоверно установить, в каком состоянии находится тракт. О работоспособности тракта в данном случае можно судить с некоторой вероятностью. Для этого введем понятие среднего значения КПД, определяемого как

$$\eta_{cp} = (\eta_1 + \eta_2)/2. \quad (11)$$

Используя (6) и (7), получаем следующее выражение

$$\eta_{cp} = \frac{|S_{21}|^2 \left(1 - |\Gamma_H|^2 \right) \left[1 + \left(|\Gamma_e S_{11}| + |\Gamma_H S_{22}| + |\Gamma_e \Gamma_H S_{21} S_{12}| + |\Gamma_e \Gamma_H S_{11}^2| \right)^2 \right]}{\left[1 - \left(|\Gamma_e S_{11}| + |\Gamma_H S_{22}| + |\Gamma_e \Gamma_H S_{21} S_{12}| + |\Gamma_e \Gamma_H S_{11}^2| \right)^2 \right]^2}. \quad (12)$$

В данном случае может быть принято решение о неисправном состоянии тракта (если $\eta_{cp} < \eta_m$) и об исправном его состоянии (если $\eta_{cp} > \eta_m$). Причем в обоих случаях существует вероятность ошибочного решения. Определим вероятность ошибки в том и другом случаях:

$$P_{oui} = \begin{cases} \int_{\eta_1}^{\eta_2} p(\eta) d\eta, & \text{при } \eta_{cp} < \eta_m; \\ \int_{\eta_m}^{\eta_1} p(\eta) d\eta, & \text{при } \eta_{cp} > \eta_m. \end{cases} \quad (13)$$

Здесь $p(\eta)$ – закон распределения случайной величины η в интервале значений $\eta_1 \dots \eta_2$. В случае, когда $\eta_{cp} = \eta_m$, а закон распределения симметричен относительно $\eta = \eta_{cp}$, получаем $P_{oui} = 0,5$. При значениях $\eta_{cp} \neq \eta_m$ вероятность ошибки $P_{oui} < 0,5$.

Рассмотрим случай равновероятного закона распределения величины η , который зададим в виде:

$$p(\eta) = \begin{cases} 0 & \text{при } \eta < \eta_1, \eta > \eta_2; \\ \frac{1}{\eta_2 - \eta_1} & \text{при } \eta_1 \leq \eta \leq \eta_2. \end{cases} \quad (14)$$

Подставив (14) в (13), получим следующие формулы для расчета:

$$P_{oui} = \begin{cases} \frac{\eta_2 - \eta_m}{\eta_2 - \eta_1} & \text{при } \eta_{cp} < \eta_m; \\ \frac{\eta_m - \eta_1}{\eta_2 - \eta_1} & \text{при } \eta_{cp} > \eta_m. \end{cases} \quad (15)$$

Обозначим $\eta_2 - \eta_1 = \Delta$, тогда $\eta_{cp} = \eta_1 + \Delta/2 = \eta_2 - \Delta/2$. С учетом этого (15) принимает вид:

$$P_{ош} = \begin{cases} \frac{\eta_{cp} - \eta_m + \Delta/2}{\Delta} & \text{при } \eta_m - \Delta/2 \leq \eta_{cp} \leq \eta_m ; \quad (a) \\ \frac{\eta_m - \eta_{cp} - \Delta/2}{\Delta} & \text{при } \eta_m \leq \eta_{cp} \leq \eta_m + \Delta/2 . \quad (b) \end{cases} \quad (16)$$

Предложенный модульный критерий оценки весьма эффективен, так как на его основе достаточно просто и быстро осуществляется оценка работоспособности (исправен, неисправен). В тех редких случаях, когда возникает неопределенность, следует принимать решение на основе расчетного значения $P_{ош}$. Для принятия решения необходимо чтобы выполнялось неравенство

$$P_{ош} < P_o , \quad (17)$$

где P_o – допустимая вероятность ошибки при принятии решения.

Если неравенство (17) не выполняется, то следует переходить к комплексной оценке на основе расчетов по формулам (4) и (5).

Дальнейшее упрощение модульной оценки работоспособности может быть достигнуто путем использования априорной информации о параметрах настроенного тракта. При настройке путем регулировок обеспечиваются параметры тракта, близкие к оптимальным: $|S_{11}|_0 \ll 1$, $|S_{22}|_0 \ll 1$, $|\Gamma_e|_0 \ll 1$, $|\Gamma_n|_0 \ll 1$; $|S_{21}|_0 \rightarrow \max$. Индекс “0” означает, что данный параметр соответствует настроенному тракту. Указанные ограничения позволяют пренебречь в (6), (7) членами второго и более высокого порядков малости. В результате получим практически предельно достижимое максимальное значение КПД

$$\eta_0 = \eta_{10} = \eta_{20} \approx |S_{21}|_0^2 . \quad (18)$$

Априорно зная η_0 , и рассчитав η_{cp} , можно оценить максимально возможный разброс значений КПД. Этот разброс не превысит величины $\pm(\eta_0 - \eta_{cp})$. Тогда предельное минимальное значение КПД составит

$$\eta_1^{np} = \eta_{cp} - (\eta_0 - \eta_{cp}) = 2\eta_{cp} - \eta_0 . \quad (19)$$

В этом случае в качестве критерия исправной работы следует принять неравенство

$$\eta_1^{np} > \eta_m . \quad (20)$$

Особенность данной упрощенной оценки состоит в том, что выполнение условия (20) гарантирует исправную работу. Однако невыполнение его не является гарантией наличия неисправности, т.е. возможна регистрация ложных отказов. Поэтому данный критерий следует применять только для гарантированной оценки исправного состояния. Поскольку большую часть времени активного функционирования радиотехническая система работает в исправном состоянии, то

данный критерий весьма эффективен, так как в данном случае нет необходимости в расчете границ зоны неопределенности.

Анализ формулы (12) для η_{cp} показывает, что эта формула содержит значительное число членов высокого порядка малости. Это позволяет ее упростить при следующих менее жестких требованиях к параметрам: $|S_{11}| < 1$, $|S_{22}| < 1$, $|\Gamma_s| < 1$, $|\Gamma_n| < 1$. Пренебрегая членами четвертого и более высокого порядков малости, получаем следующее выражение

$$\eta_{cp} = |S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_n|^2). \quad (21)$$

Таким образом, дополнительным достоинством упрощенного модульного критерия является возможность использования для оценки исправности тракта всего двух скалярных параметров: $|S_{21}|$ и $|\Gamma_n|$.

Проведенный анализ показывает, что оценку работоспособности СВЧ тракта наиболее целесообразно вести в несколько этапов, увеличивая при необходимости степень сложности критерия. Причем, в большинстве случаев (явно исправного и явно неисправного трактов) удастся обойтись либо упрощенной, либо полной модульной оценками. И лишь в том случае, когда осуществляется попадание в зону неопределенности модульной оценки, следует прибегать к вероятностной оценке, либо переходить к комплексной оценке.

Алгоритм процедуры контроля работоспособности СВЧ тракта

иллюстрируется рисунком 3. На первом этапе проводится упрощенная

модульная оценка: по формуле (19) рассчитывается η_{np} и проверяется

выполнение условия (20). Если это условие выполняется, то принимается

решение об исправности тракта. В случае отрицательного результата от

упрощенной оценки переходят к полной модульной оценке. Для этого

сначала по формуле (6) рассчитывают η_1 , а затем проверяют условие (8).

Если это условие выполняется, то принимают решение об исправности

тракта, если нет – то рассчитывают η_2 по формуле (7) и проверяют условие

(9). Если это условие выполняется, то принимают решение о

неисправности тракта, если не выполняется – то по формуле (11)

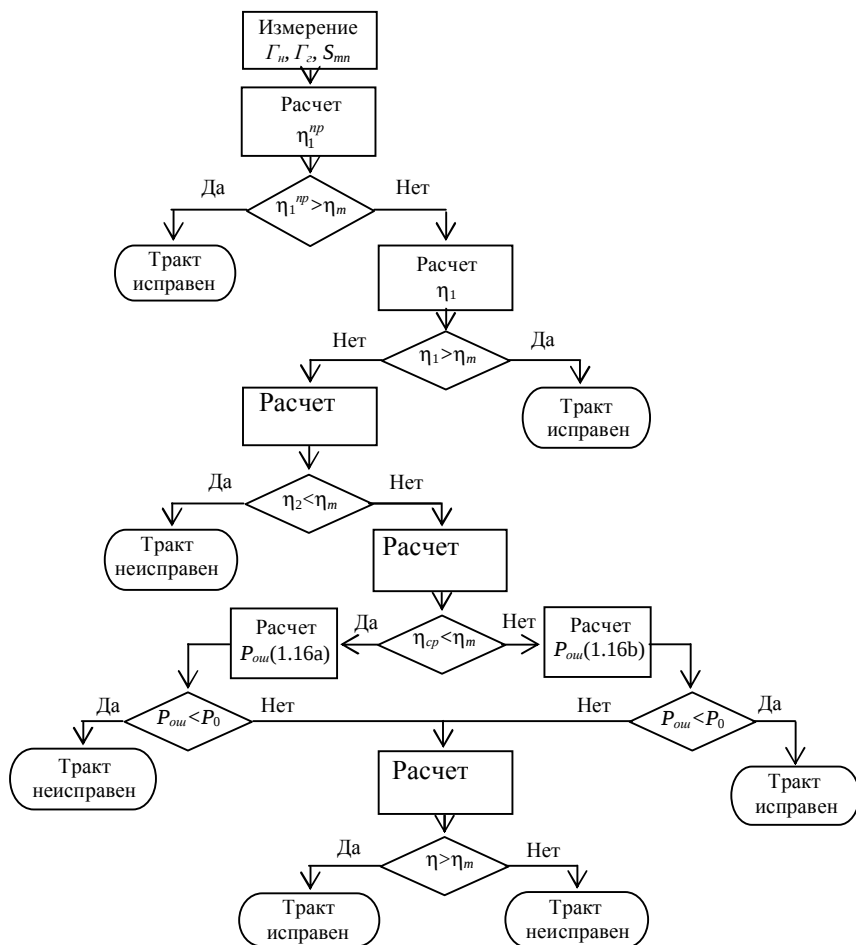


Рисунок 3 – Алгоритм процедуры контроля работоспособности микроволнового тракта

рассчитывают $\eta_{ср}$ и проверяют выполнение условия: $\eta_{ср} < \eta_m$. Если это условие выполняется, то по формуле (16a), а если оно не выполняется, то по формуле (16b) определяют вероятность ошибочного решения $P_{ош}$. Если рассчитанное значение не превышает некоторого заданного значения P_0 , то принимается решение об исправности (при выполнении условия) или неисправности (при невыполнении условия). В противном случае рассчитывают значение η по формуле (4) и проверяют выполнение условия (5). Если это условие выполняется, то принимают решение об исправности тракта, в противном случае – о его неисправности.

Рассмотренные выше варианты критериев оценки работоспособности СВЧ тракта основаны на КПД. Однако в ряде случаев такая оценка не является достаточной. В таких случаях оценка по КПД должна быть дополнена другими, важными для данного тракта ограничениями. Например, в высокоэнергетических трактах в связи с возможностью электрических пробоев повышаются требования к величине модулей коэффициента отражения на отдельных участках. Наиболее часто задаются требования к величине входного коэффициента отражения в плоскостях подключения генератора и нагрузки.

При этом критерием исправной работы является выполнение системы неравенств вида

$$\begin{cases} \eta > \eta_m ; \\ | \Gamma |_i < | \Gamma |_i^{\max} , \end{cases} \quad (22)$$

где $| \Gamma |_i, | \Gamma |_i^{\max}$ – модуль коэффициента отражения в i -ом сечении тракта и максимально допустимое его значение соответственно, $i = 1, 2, \dots, k$; k – количество сечений, в которых ограничивается значение модуля коэффициента отражения.

В радиотехнических системах с фазированными антенными решетками (ФАР) важным параметром является фазовый сдвиг, вносимый фидерной частью. Поэтому условия (22) дополняем еще ограничениями на аргумент φ_{21} коэффициента S_{21} .

В этом случае критерием исправной работы является выполнение системы неравенств

$$\begin{cases} \eta > \eta_m ; \\ | \Gamma |_i < | \Gamma |_i^{\max} ; \\ \varphi_{21}^{\min} < \varphi_{21} < \varphi_{21}^{\max} , \end{cases} \quad (23)$$

где $\varphi_{21}^{\min}$ и $\varphi_{21}^{\max}$ – границы поля допуска на параметр φ_{21} .

После принятия решения о неисправности тракта необходимо осуществить диагностику, т.е. выявить неисправные функциональные узлы. Для этого осуществляется выделение функциональных узлов (частей), входящих в фидерную часть тракта. Количество выделяемых функциональных узлов зависит от требуемой глубины диагностики.

Принципиальным моментом при решении задачи диагностики является тот факт, что заключение об исправности СВЧ узла может быть сделано только на основе анализа полной совокупности параметров, описывающих данный узел. Поэтому измерению должны подвергаться все элементы матрицы рассеяния данного узла, а ограничения должны быть наложены как на модули, так и на аргументы этих параметров, поскольку существенное отклонение как амплитудных, так и фазовых характеристик от номинальных значений свидетельствуют о неисправности данного узла. Критерии исправного состояния функциональных узлов СВЧ тракта зависят от типа узла:

– для двухполюсного

$$\begin{cases} |\Gamma_n| < |\Gamma_n|^{\max} ; \\ \varphi_n^{\min} < \varphi_n < \varphi_n^{\max} , \end{cases} \quad (24)$$

— для многополюсного

$$\begin{cases} |S_{nn}|_i < |S_{nn}|_i^{\max} ; \\ |S_{mn}|_i^{\min} < |S_{mn}|_i < |S_{mn}|_i^{\max} ; \\ \varphi_{mn\ i}^{\min} < \varphi_{mn\ i} < \varphi_{mn\ i}^{\max} . \end{cases} \quad (25)$$

В соотношениях (24) и (25) индексами “min” и “max” обозначены границы допустимых значений на соответствующий параметр. В (25) ограничения на $|S_{mn}|$ могут носить и односторонний характер. Например, коэффициент передачи фильтра $|S_{21}|$ в полосе пропускания должен быть не менее $|S_{21}|^{\min}$, а коэффициент $|S_{12}|$ для вентиля должен быть не более $|S_{12}|^{\max}$ и т.д.

Библиографический список

1. Автоматизация радиоизмерений / В.П. Балашов, Р.А. Валитов, Г.П. Вихров и др.; Под ред. В.П. Балашова. — М.: Сов. радио, 1966. — 527 с.
2. Силаев М.А. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. — М.: Сов. радио, 1970. — 248 с.

Поступила в редакцию 8.11.2001 г.