

ИЗМЕРИТЕЛЬ ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ И БАЛАНСНОГО СТАТИЧЕСКОГО КАЛОРИМЕТРА

Н. К. Соболев, В. Д. Кукуш

Харьков

Известные в настоящее время измерители проходящей мощности на основе направленного ответвителя в качестве датчиков поглощающего типа используют болометрические, термисторные или детекторные камеры, недостатком которых является то, что удовлетворительное согласование их ($K_{СВН} \leq 1,1$) удается получить в небольшой полосе частот. Вместе с тем выпускаемые отечественной промышленностью направленные ответвители обладают хорошей направленностью и незначительным перепадом переходного ослабления в сравнительно широком частотном диапазоне. При наличии широкополосного датчика поглощающего типа это позволит создать простой и надежный измеритель проходящей мощности, сохраняющий заданную погрешность измерения в полосе частот волновода.

Ниже рассматривается возможность использования в качестве датчиков поглощающего типа статических калориметров. Широкополосность и простота конструкции позволяют считать их датчиками, наиболее подходящими для вторичной цепи направленного ответвителя.

Описание функциональной схемы измерителя проходящей мощности

С точки зрения уменьшения погрешности измерения особого внимания заслуживают балансные калориметры, в которых определение мощности СВЧ сводится к измерению мощности постоянного или низкочастотного тока, необходимой для уравнивания температур рабочей и компенсационной секций.

Разработанный способ включения балансного калориметра во вторичную цепь направленного ответвителя позволяет использовать один калориметр вместо двух, что значительно упрощает схему индикации и весь прибор в целом. Отсчет проходящей мощности производится в этом случае по прибору, включенному в цепь замещения (рис. 1).

Действительно, если калориметрические секции K_1 и K_2 идентичны по тепловым свойствам и объему,

$$T_1 = cK_0 P^+; \quad T_2 = K_0(cP^- + P).$$

- Здесь T_1 и T_2 — температуры компенсационной и рабочей секций;
 K_0 — коэффициент передачи калориметрической секции, зависящий от массы и теплоемкости калориметрического тела;
 c — коэффициент переходного ослабления ответвителя;
 P^+ , P^- — падающая и отраженная мощности колебаний, распространяющихся в основном тракте ответвителя;
 P — мощность постоянного или низкочастотного тока.

В момент равенства температур секций (показания прибора ИП2 равны нулю)

$$P_{\text{пр}} = P^+ - P^- = \frac{P_0}{c},$$

где $P_0 = I^2 R_{\text{п}}$ — дополнительная мощность постоянного или низкочастотного тока, необходимая для выравнивания температур секций.

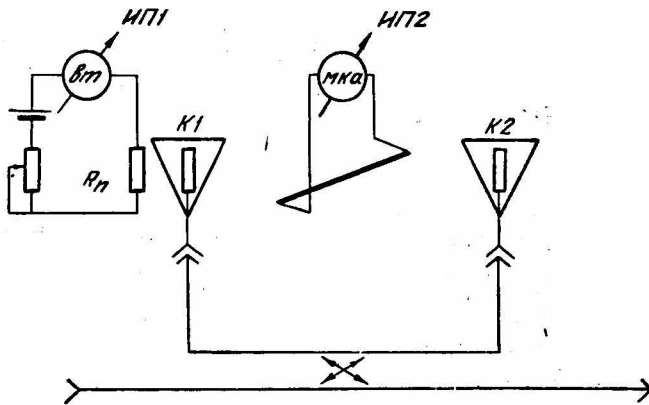


Рис. 1. Включение балансного калориметра во вторичную цепь направленного ответвителя.

Необходимость ручной регулировки в значительной мере усложняет работу с подобным прибором, а большая постоянная времени и задержка при нагреве калориметрических секций делает эту регулировку чрезвычайно трудоемкой.

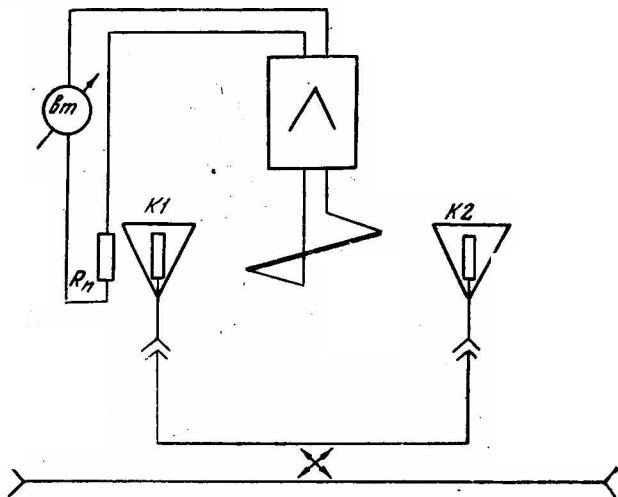


Рис. 2. Включение балансного калориметра во вторичную цепь направленного ответвителя при автоматическом замещении проходящей мощности СВЧ мощностью постоянного тока.

Указанных затруднений можно избежать, применяя систему автоматического замещения. Благодаря своим достоинствам такие системы хорошо известны и с успехом используются в измерителях мощности поглощающего типа [2, 3, 4].

Функциональная схема ваттметра с автоматическим замещением проходящей мощности СВЧ мощностью постоянного тока представлена на рис. 2. В этой схеме источником дополнительной мощности P_0 служит усиленный в десятки тысяч раз сигнал некомпенсации ΔU .

Анализ устойчивости автобалансной системы

Исследование устойчивости рассматриваемого калориметра является чрезвычайно важным, поскольку в его замкнутой цепи содержатся источники и накопители энергии (усилители и масса калориметрического тела), которые могут обмениваться запасенной энергией.

Для анализа устойчивости обратимся к структурной схеме прибора (рис. 3). Входящие в состав структурной схемы звенья 1 и 2 относятся к аperiodическим звеньям первого порядка, для которых передаточная функция имеет вид

$$W_1(p) = W_2(p) = W(p) = \frac{K_0}{1 + \tau p},$$

где τ — постоянная времени калориметрической секции.

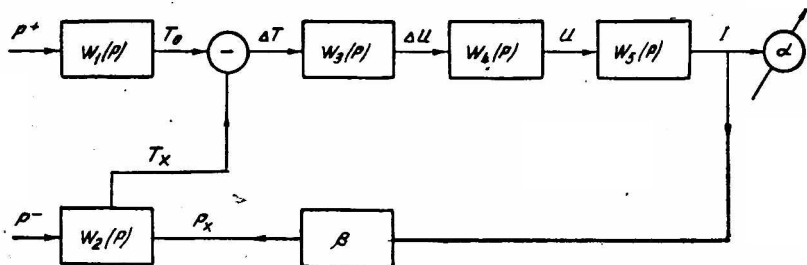


Рис. 3. Структурная схема измерителя проходящей мощности на основе направленного ответвителя и балансного статического калориметра.

При нагреве секций с некоторым запаздыванием,

$$W(p) = \frac{K_0 e^{-p\tau_0}}{1 + \tau p}. \quad (1)$$

Здесь и ниже применено интегральное преобразование Карсона.

Звенья 3, 4 и 6 можно считать безынерционными, т. е. пропорциональными, поэтому

$$\begin{aligned} W_3(p) &= \frac{\Delta U}{\Delta T} = S_T; \\ W_4(p) &= \frac{U}{\Delta U} = K_H; \\ W_5(p) &= \frac{I}{U} = \frac{1}{R_{\Pi} + R_I}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь S_T — чувствительность терморпары;

K_H — общий коэффициент усиления схемы по напряжению;

R_I — внутреннее сопротивление измерительного прибора.

Передаточную функцию звена обратного преобразования запишем в виде

$$\beta = \frac{U}{R_I + R_{\Pi}}. \quad (3)$$

При $R_I \ll R_{\Pi}$ $\beta = U$.

На основании уравнений (1), (2), (3) может быть записано в операторном виде выражение для тока через индикаторный прибор

$$I(p) = \frac{\frac{cK_0 K_n S_T}{R_n + R_i} e^{-p\tau_3} P_{np}}{(1 + \tau p) \left[1 + \beta \frac{K_0 S_T K_n e^{-p\tau_3}}{(1 + \tau p)(R_n + R_i)} \right]} = \frac{cK e^{-p\tau_3} P_{np}}{(1 + \tau p)(1 + \beta K e^{-p\tau_3})}, \quad (4)$$

где $K = \frac{K_0 K_n S_T}{R_n + R_i}$ — чувствительность цепи прямого преобразования.

Выражение (4) можно упростить, умножив числитель и знаменатель на $e^{-p\tau_3}$ и представляя экспоненту в виде ряда:

$$I(p) = \frac{cKP_{np}}{(1 + \tau p) \left(1 + \tau_3 p + \frac{\tau_3^2}{2!} p^2 + \dots \right) + \beta K}. \quad (5)$$

Пренебрегая членами степени выше трех, имеем

$$I(p) = \frac{cKP_{np}}{1 + \beta K} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\tau\tau_3^2 p^3}{2(1 + \beta K)} + \frac{\tau\tau_3 p^2}{1 + \beta K} + \frac{\tau p}{1 + \beta K}}. \quad (6)$$

Условие устойчивости системы определим, пользуясь критерием Рауса-Гурвица, предполагающим положительность коэффициентов и определителей многочлена

$$D(p) = R(p) + Q(p). \quad (7)$$

Здесь $R(p)$ и $Q(p)$ — числитель и знаменатель передаточной функции разомкнутой системы. Легко заметить, что

$$D(p) = \tau\tau_3^2 p^3 + 2\tau\tau_3 p^2 + 2\tau p + 2(1 + \beta K).$$

Поскольку величины, составляющие коэффициенты при p^n , заведомо положительны, необходимым и достаточным условием устойчивости является неравенство

$$\beta K < \frac{2\tau}{\tau_3} - 1. \quad (8)$$

Характер переходного процесса определим, переходя в выражении (5) от изображения к оригиналу. При этом воспользуемся упрощенным методом запаздывающей функции [5], для чего искомую функцию $I(t)$ заменим на более простую эквивалентную функцию $I_3(t)$, достаточно хорошо аппроксимирующую искомую

$$I_3(t) = I(t - t_3) 1(t - t_3). \quad (9)$$

Эта функция равна нулю при $t \leq t_3$ и мало отличается от искомой функции $I(t)$, если $t > t_3$ (t_3 — запаздывание аппроксимирующей функции по отношению к искомой).

Будем искать аппроксимирующую функцию (8) в классе функций, операционное изображение которых имеет вид

$$I_{3m}(t) = \frac{cKP_{np}}{1 + \beta K} \frac{e^{-p\tau_3 m}}{1 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m} = \frac{B_0 e^{-p\tau_3 m}}{B_m(p)}.$$

Здесь $b_1 = a_1 - t_{3m}$;

$$b_2 = a_2 - a_1 t_{3m} + \frac{t_{3m}^2}{2!};$$

$$\dots \dots \dots$$

$$b_m = a_m - \frac{a_{m-1} t_{3m}}{1!} + (-1)^m \frac{t_{3m}^m}{m!};$$

a_i — коэффициенты при p^i в уравнении (5);

t_{3m} — аппроксимирующая функция, полученная при m -м порядке приближения.

Порядок приближения m выбираем из следующих соображений. Нулевой порядок ($m = 0$) является слишком грубым и нас не удовлетворяет. При $m = 1$ должно выполняться условие

$$\lambda_1 = \frac{a_2}{a_1} \leq \frac{1}{2}.$$

В нашем случае $\lambda_1 = \frac{\tau_3(1 + \beta K)}{\tau_3} > \frac{1}{2}$, поэтому приближение первого порядка не выполняется.

Второго порядка приближения достаточно, если $\lambda_2 = \frac{a_3}{a_1} \leq \lambda_1 - \frac{1}{3}$, что соответствует неравенству $\frac{\tau_3(1 + \beta K)}{\tau_3^2} < \frac{1}{3}$, которое выполняется для устойчивой системы.

Для второго порядка приближения

$$I_{32}(p) = \frac{B_0 e^{-p\tau_{32}}}{1 + b_1 p + b_2 p^2}, \quad (10)$$

где t_{32} — наименьший действительный корень уравнения;

$$t_{32}^3 - 3a_1 t_{32}^2 + 6a_2 t_{32} - 6a_3 = 0. \quad (11)$$

Для решения этого уравнения воспользуемся методом приближения, согласно которому

$$t_{32} = \bar{t}_{32} + \Delta t_{32}. \quad (12)$$

Поправку Δt_{32} можно определить из формулы Ньютона

$$\Delta t_{32} = - \frac{t_{32}^3 - 3a_1 t_{32}^2 + 6a_2 t_{32} - 6a_3}{3t_{32}^2 - 6a_1 t_{32} + 6a_2}. \quad (13)$$

Здесь \bar{t}_{32} — приближенное значение наименьшего вещественного корня кубического уравнения. Можно доказать, что при $\lambda_1 > 1$

$$\bar{t}_{32} = a_1 = \frac{\tau}{1 + \beta K}. \quad (14)$$

Полное время задержки t_{32} определяем из уравнений (12), (13), (14)

$$t_{32} = \frac{6\tau_3(1 + \beta K) - 6\tau_3^2(1 + \beta K)^2 - 2\tau^2}{3(1 + \beta K)\tau - 6\tau_3(1 + \beta K)} + \frac{\tau}{1 + \beta K}. \quad (15)$$

Переходя в выражении (10) от изображения к оригиналу, имеем

$$I_{32}(t) = B_0 \left[1 - \frac{e^{-\alpha t'}}{2b_2\gamma} \left(\frac{e^{\gamma t'}}{\alpha - \gamma} - \frac{e^{-\gamma t'}}{\alpha + \gamma} \right) \right]. \quad (16)$$

Здесь

$$\alpha = \frac{b_1}{2b_2}; \quad \gamma = \sqrt{\left(\frac{b_1}{2b_2}\right)^2 - \frac{1}{b_2}}; \quad t' = t - t_{32}.$$

Легко заметить, что переменное во времени слагаемое уравнения (16) стремится к нулю, если $\alpha > 0$, т. е.

$$6\tau\tau_3(1 + \beta K) + 6\tau_3^2(1 + \beta K)^2 + \tau^2 < 0.$$

Отсюда условие устойчивости получаем в виде

$$1 + \beta K < 1,6 \frac{\tau}{\tau_3}. \quad (17)$$

Неравенство (17) не противоречит полученному ранее условию устойчивости (8), что подтверждает правомерность упрощений, сделанных выше.

Как следует из уравнения (16), характер установления показаний индикаторного прибора может быть различным.

Условия (8) и (17) охватывают как периодический $\beta K < \frac{1}{4} \frac{\tau}{\tau_3}$, так и аperiodический $\left(\beta K > \frac{1}{4} \frac{\tau}{\tau_3}\right)$ режим установления показаний.

Анализ погрешности измерения проходящей мощности

Погрешность измерения проходящей мощности с помощью описанного измерителя зависит от многих факторов: неидеальной направленности и рассогласования плеч направленного ответвителя, неэквивалентности тепловых потерь при нагреве мощностью СВЧ и постоянного тока; от конечной величины небаланса, изменения коэффициентов передачи и т. д. Указанные факторы в полной мере проявляются, если прибор самокалибруем, и частично исключаются, если прибор предварительно калибруется по образцовому.

Влияние направленности и рассогласования плеч ответвителя на погрешность измерения подробно рассмотрено в работе [1], из которой следует, что при направленности ответвителя в 30 дБ и КСВн нагрузок вторичного тракта $\leq 1,1$ неучтенная калибровкой знакопеременная составляющая погрешности $\delta_{н.о} \leq \pm 3\%$.

Систематическая погрешность $\delta_{н.п.}$, обусловленная неэквивалентностью тепловых потерь, зависит от конструкции калориметрических секций и при использовании активных нагрузок, выполняющих одновременно роль поглотителя и подогревателя, может быть малой. В связи с этим особенно удобны пленочные нагрузки, рассеивающие малые мощности, передаваемые во вторичном тракте ответвителя.

Применение пленочных нагрузок, нагрев которых происходит практически без задержки, диктуется также необходимостью снижения погрешности небаланса $\delta_{н.}$. Эта составляющая погрешности находится в прямой связи с чувствительностью цепи прямого преобразования и может быть представлена в виде

$$\delta_{н.} = \frac{\Delta P}{P_{пр}} = 1 - \frac{K}{1 + \beta K}.$$

Здесь K — коэффициент передачи цепи прямого преобразования.

Существенное влияние на результат измерения проходящей мощности оказывает также точность определения и равномерность переходного ослабления ответвителя в рабочем диапазоне частот.

При большом перепаде переходного ослабления ваттметр следует снабжать поправками, учитывающими изменение коэффициента связи с частотой.

Погрешность $\delta_{к.п.}$, обусловленная изменением коэффициентов передачи отдельных звеньев, может быть отнесена к разряду случайных и учтена

многократными измерениями. К этой составляющей отнесем также погрешности, обусловленные влиянием таких слабо воздействующих факторов, как нестабильность питающих и калибровочного напряжений, дрейф и неточность установки нуля.

Результирующую погрешность измерения проходящей мощности определим из выражения

$$\delta_{\text{рез}} = S_{\text{н.о}} + \delta_{\text{т.п}} + \delta_I + \delta_{\text{н}} \pm \sqrt{\sigma_{\text{н.о}}^2 + \delta_{\text{п.о}}^2 + \delta_{\text{к.п}}^2}$$

Здесь $S_{\text{н.о}}$, $\sigma_{\text{н.о}}$ — постоянная и знакопеременная составляющие погрешности, обусловленной неидеальной направленностью и рассогласованием плеч ответвителя; $\delta_{\text{п.о}}$ — погрешность определения переходного ослабления ответвителя; δ_I — погрешность измерения тока.

Описание макета измерителя проходящей мощности

Действующий макет измерителя проходящей мощности состоит из направленного ответвителя и балансного статического калориметра (рис. 4). Калориметр имеет две идентичные секции с диэлектриком в качестве погло-

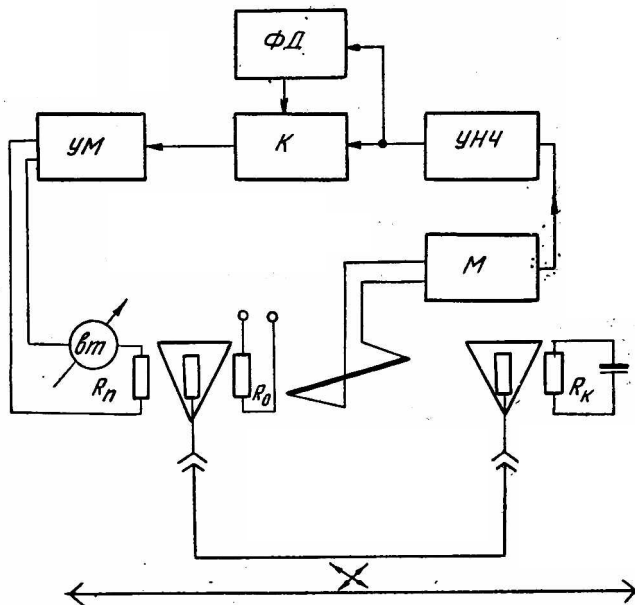


Рис. 4. Функциональная схема измерителя проходящей мощности на основе направленного ответвителя и балансного статического калориметра (М — модулятор; УНЧ — усилитель низкой частоты; К — электронный ключ; ФД — фазочувствительный детектор; УМ — усилитель мощности).

щающего вещества, дифференциальную термопару и электронный блок. Электронный блок содержит усилитель некомпенсации, измерительный прибор, цепи питания и калибровки. Для уменьшения дрейфа нуля усилитель некомпенсации выполнен по схеме модулятор-усилитель переменного тока — демодулятор.

Цель эксперимента — проверка работоспособности макета при описанном способе включения балансного калориметра, поэтому измерения производились на постоянном токе. Это позволило упростить измерения и свести к нулю погрешность за счет неэквивалентности нагрева калори-

метрических секций мощностью СВЧ и постоянного тока. В процессе эксперимента мощность от одного источника постоянного тока, имитирующего падающую мощность СВЧ, рассеивалась на сопротивлении R_k рабочей секции. Заменяющая отраженную мощность СВЧ мощность постоянного тока рассеивалась на сопротивлении R_0 , подогревающим компенсационную секцию. Для подачи сигнала обратной связи компенсационная секция имела дополнительную обмотку R_p . Рассеиваемые на секциях мощности контролировались с помощью приборов постоянного тока.

Результаты эксперимента приведены в таблице, в которой представлены значения тока через индикаторный прибор для различных значений падающей P^+ и проходящей мощности P^- .

α , мка	0	20	40	60	80	100
P^+ , вт	0	0,7	1,25	1,8	2,35	3
$P^+ - P^-$, вт	0,1	0,7	1,3	1,78	2,3	3,1

Здесь α — ток через индикаторный прибор.

ВЫВОДЫ

Описанное устройство может быть использовано для исследования СВЧ трактов, по которым распространяются колебания мощностью $\geq 1,0$ вт. При соответствующей конструкции калориметрических секций нижний предел измеряемой мощности может быть уменьшен. Верхний предел измеряемой мощности, определяемый электрической прочностью направленного ответвителя, зависит от выбранного тракта СВЧ, формы и расположения отверстий связи.

Описанная схема обработки сигналов, снимаемых с боковых плеч направленного ответвителя, может быть применена и при использовании других датчиков мощности СВЧ (болометров, термисторов, термопар и т. д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. К. Соболев, И. В. Явников, Г. П. Щербинин, В. Д. Кукуш. Измеритель проходящей мощности СВЧ на основе направленного ответвителя. Самолетостроение и техника воздушного флота, 1968, вып. 16. Изд-во Харьковского университета.
2. В. Д. Кукуш и др. Измеритель отклонений уровня мощности на основе балансного статического калориметра. Вопросы радиоэлектроники. Серия «Радиоизмерительная техника», 1966, вып. 2.
3. Wholey B. and Boff F. Proceedings of IEEE, v 109, Sypl. № 2—3, 1962, стр. 740—743.
4. Ditro M. I., Nadler L. A., Blanchard S. I. PRD Reports, 6, № 2, 1959, стр. 188—202.
5. Я. С. Ицхоки. Приближенный метод анализа переходных процессов в сложных линейных цепях. Изд-во «Советское радио», 1969.
6. А. Анго. Математика для радиоинженеров. Изд-во «Наука», 1964.
7. Е. И. Юревич. Теория автоматического регулирования. Изд-во «Энергия», Л., 1969.