

ИЗМЕРИТЕЛЬ ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ КООКСИАЛЬНЫХ ТРАКТОВ С НЕСОГЛАСОВАННОЙ НАГРУЗКОЙ

В. Н. Жендубаев, И. И. Зозуля

Харьков

Для измерения проходящей мощности в волноводных трактах предложено устройство со смешанными индуктивно-емкостными связями [1], принцип действия которого основан на квадратичном электрическом перемножении сигналов, пропорциональных поперечным E - и H -компонентам электромагнитного поля. В данной статье описывается подобный измеритель проходящей мощности для коаксиальных трактов.

Принцип действия

Для выполнения операций суммирования и вычитания, которые необходимы при квадратичном электрическом перемножении сигналов, пропорциональных поперечным компонентам поля E и H , в [2, 3] использовался двойной волноводный тройник. Однако в коаксиальном исполнении он представляет собой сложное в изготовлении и настройке устройство, поэтому в разработанном измерителе для реализации алгоритма квадратичного перемножения сигналов используются смешанные индуктивно-емкостные зонды [1].

Поскольку размеры зонда значительно меньше длины волны в коаксиальной линии процессы, происходящие в зонде, могут быть изучены с помощью эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами (рис. 1).

По аналогии с [4,5] получим следующие выражения для магнитной и электрической э. д. с., наведенных в зонде поперечными компонентами поля волны ТЕМ:

$$\dot{U}_M = -j\omega\mu_0 S_M \cdot \frac{|E^+|}{z_0} e^{j\beta z} [1 - \Gamma e^{-2j\beta z}] e^{j\omega t}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_S = j\omega\varepsilon_0 z_0 \left(1 - j\frac{h}{\omega z_0 S_S}\right) S_S |E^+| e^{j\beta z} [1 + \Gamma e^{-2j\beta z}], \quad (2)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость свободного пространства;

$S_m = h2\Delta z \frac{\sin \beta\Delta z}{\beta\Delta z}$ — эффективная площадь зонда по магнитной компоненте;

$|E^+|$ — амплитуда поперечной компоненты электрического поля падающей волны;

z_0 — волновое сопротивление линии;

β — фазовая постоянная;

Γ — комплексный коэффициент отражения;

h — высота зонда;

$2\Delta z$ — размер зонда по координате z ;

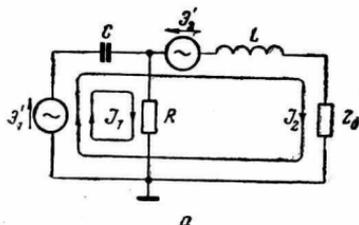
$S_e = D2\Delta z \frac{\sin \beta\Delta z}{\beta\Delta z}$ — эффективная площадь зонда по электрической компоненте;

ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства;

D — поперечный размер емкостной пластины, подключенной к зонду для увеличения связи с электрической компонентой поля.

Используя методы теории цепей, для эквивалентной схемы

индуктивно-емкостного зонда при выполнении условий равенства амплитуд и фаз токов, обусловленных э. д. с. (1), (2) [1], получаем выражение для тока нагрузки

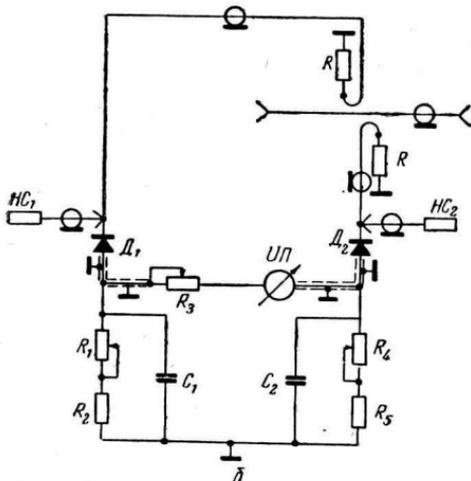


$$I_2' = K |E^+| \exp [j (\omega t + \beta z + \psi)], \quad (3)$$

где K — коэффициент пропорциональности;

ψ — фазовый сдвиг, вносимый нагруженными зондами.

Если плоскость зонда развернуть на 180° , то э. д. с., наведенная поперечной магнитной компонентой, изменит направление. При этом уравнение для тока I_2 принимает вид



$$I_2'' = -K |E^+| \cdot |\Gamma_H| \exp [j \times (\omega t - \beta z + \psi + \varphi)], \quad (4)$$

(φ — фаза коэффициента отражения).

Рис. 1. Эквивалентная схема зонда (а); принципиальная схема прибора (б).

Анализируя выражения (3) и (4), можно сделать вы-

вод, что токи в нагрузках зондов, развернутых относительно друг друга на 180° , пропорциональны падающей и отраженной волнам.

Сопротивление R включается последовательно с зондом для получения направленных свойств зонда [6].

Если сигналы (3), (4) подать на квадратичные детекторы D_1 , D_2 (рис. 1), то для постоянной составляющей тока магнитоэлектрического индикатора (И. П.) можно записать следующее выражение:

$$\bar{i} = \frac{R_1 [(\bar{I}_2')^2 - (\bar{I}_2'')^2]}{R_n} = \frac{R_1 b K^2}{R_n} |E^+|^2 (1 - |\Gamma_n|^2), \quad (5)$$

где \bar{I}_2' и \bar{I}_2'' — средние значения токов детекторов за период колебания;

R_n — сопротивление индикатора.

Обозначая $z_0 \cdot \frac{R_1 b K^2}{R_n} = S$, получаем уравнение

$$\bar{i} = S \frac{|E^+|^2}{z_0} (1 - |\Gamma_n|^2) = S P_{\text{пр}} \quad (6)$$

($P_{\text{пр}}$ — проходящая мощность).

Коэффициент S находим при калибровке; он определяет чувствительность прибора. Из уравнения (6) следует, что ток индикатора пропорционален проходящей мощности.

Конструкция прибора

Измеритель выполнен в виде настольного переносного прибора, рабочая длина волны $\lambda = 1,65$ м, коаксиальный тракт сечением $16 \times 6,95$ мм.

Описываемый коаксиальный измеритель проходящей мощности состоит из трех СВЧ узлов: секции с датчиками и двух одинаковых детекторных секций с согласованными нагрузками. Электрически эти узлы соединены между собой разъемами.

В контролируемый тракт непосредственно включается секция, которая представляет собой отрезок жесткого коаксиала с установленными на нем датчиками. Конструктивно оба датчика со смешанными индуктивно-емкостными зондами выполнены одинаково в виде отрезков жесткой коаксиальной линии. Датчики с основным трактом связаны с помощью петлеобразных прямоугольных зондов, погруженных в тракт так, чтобы их плоскость была перпендикулярна к силовым линиям магнитного поля. Экспериментально выбраны оптимальные размеры зондов (высота 4—5 мм, длина 5—15 мм). Емкостная пластина изготовлена из медной фольги толщиной 0,1 мм, размеры которой подбирались в соответствии с длиной петли $2\Delta z = 5 \div 15$ мм; $D = 2$ мм. Один конец зонда соединен последовательно с сопротивлением R , находящимся в нише корпуса датчика, другой — с внутрен-

ним проводником датчика. Величина сопротивления выбирается экспериментально и может изменяться в пределах 50—100 ом.

Сигнал с каждого датчика поступает в детекторную секцию, выполненную в виде отрезка жесткого коаксиала, на котором укреплены детекторные головки. Конструктивно детекторные головки также выполнены в виде отрезков жестких коаксиальных линий, на оси каждой из которых закреплен кристаллический диод Д 405. Детекторная головка с секцией связывается с помощью петлеобразного зонда [5]. За счет изменения размеров петли выбирается величина сигнала, необходимая для отклонения стрелки индикатора на полную шкалу. Съем сигнала с головки производится при помощи токосъемника, выведенного на ее корпус.

Разъем присоединяет к детекторной секции согласованную нагрузку, выполненную в виде отрезка коаксиала, в разрыв центрального проводника которого включено сопротивление типа УНУ-50 ом. Хорошее согласование получено изменением наружного диаметра коаксиала по экспоненте вдоль всей длины сопротивления. КСВ нагрузки не более $1,05 \div 1,08$.

С детекторных головок квадрированные сигналы подаются на вычитающую схему (см. рис. 1). Переменные сопротивления нагрузок детекторов R_1 и R_4 служат для установки необходимого режима работы диодов.

Индикатор, в качестве которого используется микроамперметр М-900, включается между нагрузками детекторов и измеряет разность продетектированных сигналов. Показания индикатора пропорциональны произведению компонент электрического и магнитного полей и соответствуют проходящей мощности в контролируемом тракте. Переменное добавочное сопротивление R_3 предназначается для установки стрелки индикатора на конец шкалы при градуировке прибора.

Результаты экспериментальных исследований

В результате проведенных исследований были сняты основные характеристики прибора. Для измерений использовался генератор СВЧ-колебаний с длиной волны $\lambda = 1,65$ м и пределами изменения мощности $0 \div 10$ вт. В качестве образцового измерителя мощности применялся масляный калориметр оконечного типа (рис. 2).

Определялась зависимость отношения проходящей мощности $P_{пр}$ к падающей P^+ от КСВН. Тракт рассогласовывался с помощью короткозамкнутого шлейфа до КСВН = 2,5; при этом отклонение кривой $\frac{P_{пр}}{P^+}$ от теоретической кривой $(1 - |\Gamma_n|^2)$ составляло 1%.

Снимались показания испытываемого и образцового приборов в зависимости от изменения фазы отраженной волны. Для этого с помощью коаксиального тройника к испытываемому прибору подключался рассогласователь-фазовращатель, состоящий из короткозамкнутого шлейфа и линии переменной длины. Посредством рас-

согласователя и измерительной линии в тракте устанавливался $K_{СВН} = 1,85$. После этого фазовращателем изменялись значения фазы отраженной волны через равные промежутки в пределах 360° и снимались показания приборов. По результатам измерений определялась систематическая погрешность γ' как разность среднего значения показаний испытываемого измерителя проходящей мощности и среднего значения проходящей мощности измеренного по образцовому прибору, а также случайная погрешность σ' .

Все погрешности определены по результатам измерений. Они относятся к основным погрешностям и в зависимости от факторов, воздействующих на прибор, составляют:

а) погрешность за счет изменения фазы отраженной волны $\gamma' = -1,3\%$; $\sigma' = \pm 2,75\%$;

б) погрешность за счет нестабильности выходной мощности генератора $\gamma' = +1\%$; $\sigma' = \pm 0,58\%$.

Предельная погрешность прибора определялась по формуле (см. статью В. Д. Кукуша, В. Н. Жендубаева «Определение погрешностей ваттметров проходящей мощности СВЧ при градуировке с помощью образцового прибора» в настоящем сборнике)

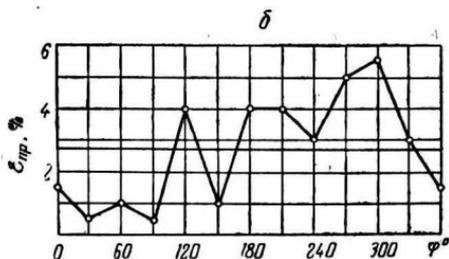
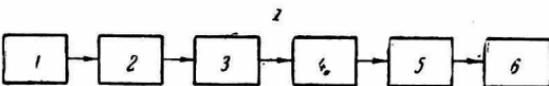


Рис. 2. Блок-схема испытаний прибора (а):

1 — генератор СВЧ большой мощности; 2 — развязывающий элемент; 3 — испытываемый прибор; 4 — измерительная линия; 5 — рас-согласователь-фазовращатель; 6 — образцовый измеритель мощности; зависимость погрешности прибора от изменения фазы СВЧ-колебаний (б).

$$\epsilon_o' = \gamma_o' + m\sigma_o',$$

где γ_o' — приведенная систематическая погрешность;

σ_o' — приведенная среднеквадратичная погрешность;

m — число, величина которого зависит от закона распределения и доверительной вероятности.

С учетом погрешностей, приведенных выше, и погрешности образцового прибора $\pm 2\%$ (имеется только случайная составляющая) приведенная к концу шкалы погрешность составляет $10,5\%$ с доверительной вероятностью $0,997$.

В ы в о д ы

1. Описанный измеритель проходящей мощности коаксиального типа со смешанными индуктивно-емкостными связями измеряет мощность в пределах $0 \div 10 \text{ вт}$.

2. Прибор работает в условиях реально подключенной нагрузки, рассогласованной до значений КСВН = 10. Показания прибора зависят от рассогласования постольку, поскольку от него зависит проходящая мощность.

3. Измеритель можно использовать в трактах любого сечения и для измерения средних уровней мощности.

Ограничением в применении прибора на малых уровнях является недостаточная чувствительность диодов. Для повышения чувствительности прибора необходимо увеличивать геометрические размеры зондов, что ведет к возрастанию собственного КСВ прибора и погрешности измерений.

Использование прибора на больших уровнях связано с трудностью механического изготовления зондов малых размеров.

4. Неисключенная систематическая погрешность за счет изменения фазы отраженной волны возникает при градуировке в условиях работы прибора на согласованную нагрузку. Устранить ее можно проведением повторной градуировки в условиях работы измерителя на рассогласованную нагрузку.

5. Погрешность прибора не превышает 11%.

6. Для повышения надежности прибор целесообразно запрессовать в пенополистирол или другой диэлектрик, сходный с ним по электрическим параметрам и не уступающий ему по механической прочности.

При больших изменениях температуры окружающей среды для повышения надежности необходимо применять вакуумные диоды, параметры которых меньше зависят от температуры.

7. Конструкция измерителя проста: он имеет малые габариты и может быть использован в коаксиальных трактах стационарных и подвижных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Жендубаев, В. Д. Кукуш, И. И. Зозуля. Измеритель проходящей мощности со смешанными индуктивно-емкостными связями. *Сб. «Радиотехника»*, вып. 17, Харьков. Изд-во ХГУ, 1971.
2. В. Д. Кукуш, В. Н. Жендубаев и др. Отчет по НИР № 70 — 10, ч. II, Харьков, 1971.
3. А. И. Латенко. Аналоговые множительные устройства. Изд-во «Советское радио», 1960.
4. Ф. Тишер. Техника измерений при сверхвысоких частотах. Физматгиз, 1963.
5. Н. К. Бондаренко, Г. А. Дейнега, Э. В. Маграчев. Автоматизация измерений параметров СВЧ-трактов. Изд-во «Советское радио», 1963.
6. В. Parzen and A. J. Low. «Theory and Design of the Reflectometer» — *Electrical Communication*, vol. 24, 1947, March—December, p. 94—100.
7. Б. Е. Рабинович. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. «Вопросы радиоэлектроники», сер. 6, 1961.