

# ИЗМЕРИТЕЛЬ ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ПЕРЕМНОЖЕНИЕМ ЧАСТОТНО-ПРЕОБРАЗОВАННЫХ СИГНАЛОВ

*В. Н. Жендубаев, Е. К. Богомолв*

Харьков

Описывается коаксиальный измеритель проходящей мощности, основанный на непосредственном перемножении частотно-преобразованных сигналов, пропорциональных поперечным компонентам электромагнитного поля. Приводятся характеристики, схема и конструкция опытного образца прибора. Коаксиальный тракт сечением  $16 \times 6,95$  мм, пределы измеряемых мощностей 0 — 100 вт, рабочие частоты 182 и 192 Мгц.

При регулировке и эксплуатации радиопередающих устройств СВЧ диапазона возникает потребность в достоверной информации о проходящей мощности.

В данной статье описываются исследования и разработка измерителя проходящей мощности, основанного на принципе электрического перемножения частотно-преобразованных сигналов, пропорциональных поперечным составляющим поля.

## Принцип действия

Принцип, положенный в основу данного метода измерения, основан на перемножении преобразованных по частоте сигналов с электрического и магнитного зондов при помощи электродинамического ваттметра. На рис. 1 показана блок-схема прибора, реализующая этот принцип.

Для сигналов зондов, расположенных в одном поперечном сечении коаксиальной линии передачи, можно записать следующие выражения:

$$U_s = k_1 |E^+| [\cos(\omega_c t + \beta z + \varphi_s) + |\Gamma_n| \cos(\omega_c t - \beta z + \varphi_s + \varphi)]; \quad (1)$$

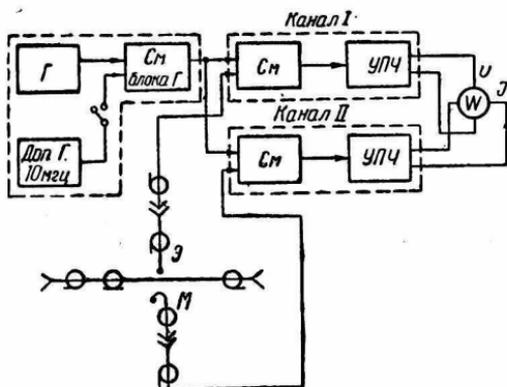
$$U_m = k_2 \cdot \frac{|E^+|}{z_0} [\cos(\omega_c t + \beta z + \varphi_m) - |\Gamma_n| \cos(\omega_c t - \beta z + \varphi_m + \varphi)], \quad (2)$$

где  $E^+$  — напряженность поля падающей волны;  
 $\Gamma = |\Gamma_n| e^{j\varphi}$  — комплексный коэффициент отражения от нагрузки;  
 $\varphi_3, \varphi_m$  — фазовые сдвиги, вносимые нагруженными электрическими и магнитными зондами;  
 $k, k_2$  — коэффициенты связи зондов с трактом.  
 Сигнал гетеродина

$$U_r = E_r \cos(\omega_r t + \varphi_r), \quad (3)$$

где  $\omega_r$  — частота сигнала гетеродина;  
 $\varphi_r$  — начальная фаза;  
 $E_r$  — амплитуда сигнала гетеродина.

Преобразование частоты есть перемножение преобразуемого сигнала и сигнала гетеродина [1].



Учитывая сказанное выше, запишем выражение для преобразованных сигналов:

$$U_{np}^3 = U_s U_r = k_n k_1 |E^+| E_r [\cos(\omega_c t + \beta z + \varphi_3) + |\Gamma_n| \cos(\omega_c t - \beta z + \varphi_3 + \varphi)] \cos(\omega_r t + \varphi_r); \quad (4)$$

$$U_{np}^M = U_M U_r = k_n k_2 \times \frac{|E^+|}{z_0} E_r [\cos(\omega_c t +$$

$$+ \beta z + \varphi_m) - |\Gamma_n| \cos(\omega_c t - \beta z + \varphi_m + \varphi)] \cos(\omega_r t + \varphi_r), \quad (5)$$

где  $k_n$  — коэффициент передачи преобразователя.

После элементарных преобразований выражений (4), (5)

$$U_{np}^3 = K_n K_1 |E^+| \frac{E_r}{2} [\cos(\omega_n t + \beta z + \varphi_3 - \varphi_r) + |\Gamma_n| \cos(\omega_n t - \beta z + \varphi_3 + \varphi - \varphi_r)]; \quad (6)$$

$$U_{np}^M = k_n k_2 \cdot \frac{|E^+|}{z_0} \cdot \frac{E_r}{2} [\cos(\omega_n t + \beta z + \varphi_m - \varphi_r) - |\Gamma_n| \cos(\omega_n t - \beta z + \varphi_m + \varphi - \varphi_r)], \quad (7)$$

где  $\omega_n = |\omega_c - \omega_r|$  — промежуточная частота.

Промежуточная частота выбирается равной рабочей частоте электродинамического ваттметра. Преобразованные сигналы (6) и (7) подаются на обмотки ваттметра. Токи, протекающие в обмотках ваттметра:

$$I_u = k_u k_n k_1 |E^+| \frac{E_r}{2} [\cos(\omega_n t + \beta z + \varphi_3 - \varphi_r) +$$

$$+ |\Gamma_n| \cos(\omega_n t - \beta z + \varphi_3 + \varphi - \varphi_r)]; \quad (8)$$

$$I_i = k_i k_n k_2 \frac{|E^+|}{z_0} \cdot \frac{E_r}{2} [\cos(\omega_n t + \beta z + \varphi_m - \varphi_r) - \\ - |\Gamma_n| \cos(\omega_n t - \beta z + \varphi_m + \varphi - \varphi_r)], \quad (9)$$

где  $k_i$ ,  $k_u$  — коэффициенты пропорциональности между токами обмоток и напряжениями.

Угол отклонения стрелки ваттметра пропорционален произведению токов обмоток:

$$\gamma = k I_i I_u = \\ = k k_i k_u k_1 k_2 k_n^2 \frac{E_r}{z_0} \cdot \frac{|E^+|}{8} [\cos 2(\omega_n t + \beta z - \varphi_r) \cos(\varphi_3 - \varphi_m) - \\ - \sin 2(\omega_n t + \beta z - \varphi_r) \sin(\varphi_3 + \varphi_m) - |\Gamma_n|^2 \cos 2(\omega_n t - \beta z + \\ + \varphi - \varphi_r) \cos(\varphi_3 + \varphi_m) + |\Gamma_n|^2 \sin 2(\omega_n t - \beta z + \varphi - \varphi_r) \sin(\varphi_3 + \\ + \varphi_m) + \cos(\varphi_3 - \varphi_m)(1 - |\Gamma_n|^2) + |\Gamma_n| 2 \sin(2\beta z - \varphi) \times \\ \times \sin(\varphi_3 - \varphi_m)]. \quad (10)$$

Среднее значение выражения (10) за период промежуточной частоты запишется в виде

$$\bar{\gamma} = k I_i I_u = \\ = k k_i k_u k_n^2 k_1 k_2 \frac{E_r^2}{8} \cdot \frac{|E^+|}{z_0} [(1 - |\Gamma_n|^2) \cos(\varphi_3 - \varphi_m) + \\ + 2 |\Gamma_n| \sin(2\beta z - \varphi) \sin(\varphi_3 - \varphi_m)]. \quad (11)$$

При равенстве фазовых углов  $\varphi_3 = \varphi_m$  выражение (11) дает

$$\bar{\gamma}_u = S \cdot \frac{|E^+|}{z_0} (1 - |\Gamma_n|^2) = S P_{пр}, \quad (12)$$

где  $S = k k_i k_u k_n^2 k_1 k_2 \cdot \frac{E_r}{8}$  — чувствительность прибора.

Коэффициент  $S$  определяется при калибровке прибора

$$\bar{\gamma}_0 = S P_0, \quad (13)$$

откуда

$$S = \frac{\bar{\gamma}_0}{P_0}$$

( $P_0$  — мощность, соответствующая точке калибровки).

Подставляя (13) в (12), получаем

$$\bar{\gamma}_u = \frac{\bar{\gamma}_0}{P_0} \cdot P_{пр}. \quad (14)$$

Уравнение (14) связывает измеряемую величину с измеряемым параметром, т. е. является уравнением измерения.

Анализируя выражение (11), можно сделать вывод, что равенство углов  $\varphi_3 = \varphi_m$  является необходимым, поскольку в противном случае показания прибора зависят от фазы отраженной

волны. Эта зависимость тем больше, чем больше коэффициент отражения от нагрузки.

Используя (11) и (12), относительную погрешность измерения проходящей мощности запишем в виде

$$\delta_p = 2 \sin \frac{\varphi_3 - \varphi_m}{2} \left[ \sin \frac{\varphi_3 - \varphi_m}{2} - \frac{2 |\Gamma_H|}{1 - |\Gamma_H|^2} \right] \sin (2\beta z - \varphi) \cos \frac{\varphi_3 - \varphi_m}{2}. \quad (15)$$

Из выражения (15) можно сделать вывод, что наименьшую погрешность в любом случае получаем при  $\varphi_3 = \varphi_m$ .

### Конструкция прибора

Измеритель проходящей мощности состоит из следующих узлов: коаксиальной секции с датчиками, блока гетеродина, блока преобразователя частоты, блока усилителя промежуточной частоты и блока питания. Конструктивно все блоки установлены на одном общем шасси.

Коаксиальная секция с зондами включается непосредственно в разрыв контролируемого тракта. Электрический и магнитный датчики установлены друг против друга в одном поперечном сечении секции. В работе [3] описываются конструкции таких датчиков, а также метод исследования «чистоты» связей.

Сигналы зондов по коаксиальным кабелям подаются в каналы преобразования частоты *I* и *II*, первыми каскадами которых являются смесители. Их основная функция — преобразование частоты сигнала 192 и 182 Мгц 8кгц. Выбор такой промежуточной частоты обусловлен применением в качестве оконечного индикатора мощности ваттметра Д-30, рабочая частота которого 8 кгц.

Кроме напряжения сигнала, на смесители обоих каналов преобразования подается напряжение гетеродина с частотой соответственно 191, 992 или 181, 992 Мгц.

Гетеродин состоит из задающего генератора, стабилизированного кварцем на 12 Мгц, и четырех последовательных каскадов удвоения частоты. С последнего каскада напряжение гетеродина с частотой 191, 992 Мгц поступает на смеситель блока гетеродина, работающий в этом случае как обычный усилитель высокой частоты. Если на смеситель подается сигнал от дополнительного генератора, стабилизированного кварцем на 10 Мгц, на анодном контуре смесителя выделяется напряжение с частотой 181, 992 Мгц.

Напряжение промежуточной частоты поступает на усилители промежуточной частоты каналов *I* и *II*, основным назначением которых является обеспечение заданного режима работы электродинимического ваттметра Д-30. Усилители обоих каналов имеют одинаковую конструкцию и отличаются лишь параметрами выходных трансформаторов, которые обеспечивают соответственно в канале *I* напряжение 100 в на выходе, а в канале *II* — ток 5 а, необходимый для работы электродинамического ваттметра.

## Результаты исследований

Цель исследований — экспериментальная проверка принципа действия и измерение параметров, характеризующих измерительную проходящую мощность. Проверка основных характеристик производилась на частотах  $f = 182$  и  $192$  МГц. Испытывались электрический и магнитный датчики, находящиеся на коаксиальной секции, встроенной в прибор. Существенным требованием является достижение «чистоты» связей. Исследование «чистоты» связей проводилось по методике работы [3].

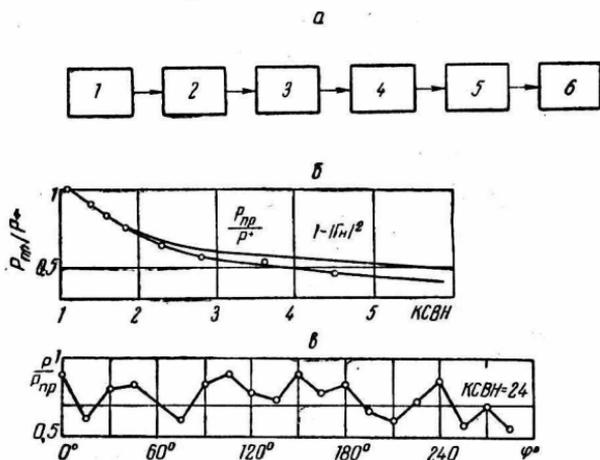


Рис. 2. Блок-схема испытаний прибора (а); зависимость показаний прибора от КСВН (б); зависимость показаний прибора от фазы СВЧ-колебаний (в).

Зависимость показаний индикатора прибора от КСВН основного тракта проверялась по блок-схеме рис. 2, а, где 1 — генератор СВЧ мощности, 2 — вентиль, 3 — измерительная линия, 4 — исследуемый прибор, 5 — рассогласователь-фазовращатель, 6 — согласованная нагрузка. В качестве рассогласователя использовался короткозамыкающий поршень, подключаемый к одному плечу коаксиального тройника, который позволил менять КСВН от 1,1 до 5,0. Измерения проводились при помощи измерительной линии ЛИ-3.

Зависимость показаний индикатора от КСВН приведена на графике (рис. 2, б). Из рисунка видно, что если КСВН не больше двух, показания прибора практически совпадают со значениями кривой поглощенной мощности ( $1 - 1/\Gamma_{\text{н}}^2$ ); при значении КСВН, равном 5, расхождения составляют 9%. Сравнительно большие расхождения обусловлены погрешностью измерительной линии при измерении КСВН свыше двух, которая превышает 10%.

Кроме этого, исследовались зависимости показаний прибора от фазы СВЧ-колебаний по той же блок-схеме рис. 2, а, где в качестве

элемента, изменяющего фазу, использовалась линия переменной длины с нагрузкой, рассогласованной до КСВН, равного 2,4.

График зависимости показаний индикатора прибора от фазы СВЧ-колебаний приведен на рис. 2, в. Погрешность измерения, определенная по результатам экспериментов, не превышает 10%.

## ВЫВОДЫ

Использование непосредственного перемножения частотно-преобразованных сигналов позволяет избежать суммирования и вычитания сигналов «чистых» связей.

Построение схемы преобразователя в данном диапазоне частот не представляет затруднений. Прибор, построенный на предлагаемом принципе, можно применять для измерения малых уровней мощности, поскольку чувствительность в таком случае регулируется изменением коэффициента усиления в каналах преобразования частоты. Данный измеритель проходящей мощности может работать только в трактах с высокой стабильностью частоты. Это связано с тем, что в описанной конструкции применен гетеродин, стабилизированный кварцем; в дальнейших разработках более рационально использовать гетеродин, не стабилизированный кварцевым резонатором, и ввести схему, позволяющую подстраивать частоту гетеродина. Кроме того, не исключена возможность создания аналогичного прибора на полупроводниковых приборах, что значительно уменьшит габаритные размеры его и повысит надежность в работе.

Описанный измеритель проходящей мощности может быть использован для измерения мощности в трактах с произвольной нагрузкой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Бобров, Г. В. Максимов, В. И. Мичурин, Д. П. Николаев. Радиоприемные устройства. Изд-во «Советское радио», 1971. 448 с.

2. Ф. Тишер. Техника измерений на сверхвысоких частотах. Физматгиз, 1963.

3. В. Н. Жендубаев, В. Д. Кукуш, Э. Р. Галеев. Измеритель проходящей мощности СВЧ для волноводных трактов с произвольной нагрузкой. Сб. «Вопросы радиотехники», вып. 3. Изд-во ХГУ, 1971, с. 17—21.

---