

## О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

*Д. Д. Литвинов*

Выбор варианта измерительной схемы или создание измерительного прибора, отвечающего заранее поставленным требованиям, не представляется возможным без предварительного детального анализа источников погрешностей и оценки влияния их на точность измерения.

Анализу погрешностей измерительной линии посвящен ряд работ [1—2]. Анализ погрешностей устройства, состоящего из зондовой головки и сдвигателя фазы стоячей волны, в достаточно полном виде в литературе не приведен. Следует также отметить, что в указанной литературе описан анализ погрешностей методом эквивалентных схем, который имеет ряд недостатков. Он очень громоздкий, так как часто требует эквивалентного представления каждой отдельной неоднородности тракта [1—2, 5, 6]. Последнее является причиной малой общности этого метода, ибо требует учета особенностей каждой данной конструкции. Кроме того, некоторые факторы, влияющие на точность измерения, невозможно отобразить на эквивалентной схеме (например, наличие щелевой волны).

В данной работе для сравнения точности измерения КСВН этими двумя приборами приводится анализ присущих им погрешностей. Вывод выражений для максимальных или предельных значений парциальных погрешностей измерения КСВН этими приборами произведен с единой точки зрения с помощью матриц рассеяния. Взят самый общий случай, т. е. рассмотрены многополюсники с потерями. Благодаря этому результаты анализа могут быть использованы для оценки погрешностей измерительных линий и зондовых головок с фазосдвигателем как сантиметрового, так и миллиметрового диапазона радиоволн, где потери в волноводном тракте значительны.

\* \* \*

В отличие от прямопоказывающих приборов (вольтметры, гальванометры и т. п.) устройства, применяющиеся для измерения КСВН, обычно используются в комплекте с другими приборами: генератором, индикатором и т. д. Поэтому, очевидно, в погрешность измерения КСВН неизбежно войдут также погрешности, обусловленные генератором, индикатором и др. Далеко не всегда данные генератор и индикаторная схема являются неотъемлемой частью определенного измерителя КСВН. Погрешность измерения КСВН нагрузки тем или иным измерителем, очевидно, можно разбить на три части:

1. Погрешность, обусловленную генератором.
2. Погрешность собственно измерителя.
3. Погрешность, обусловленную индикатором.

В статье полностью рассмотрены погрешности второй группы, а из погрешностей первой и третьей группы — только погрешности, обуслов-

ленные рассогласованием генератора и индикатора с высокочастотным трактом. Погрешности, вызванные непостоянством уровня высокочастотных колебаний и неквадратичностью характеристики детектора, довольно полно рассмотрены в литературе [3] и в данной статье не анализируются. Для обоих измерительных устройств рассмотрены погрешности измерения КСВН высокочастотных нагрузок методом «максимума — минимума».

1. Измерительная линия, как показано на рис. 1, может быть представлена в виде шестиполюсника. Как известно, в шестиполюснике связь между амплитудами падающих  $a_i$  и отраженных  $b_i$  волн может быть записана с помощью матрицы рассеяния третьего порядка, т. е.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

или  $\hat{b} = \hat{S} \cdot \hat{a}$ .

Если к зажимам 1—1 присоединить измерительный генератор, к зажимам 3—3 — измеряемую нагрузку, а к зажимам 2—2 — детекторную головку, то можно показать, что амплитуду волны, падающей на детекторную головку, можно представить как (9)

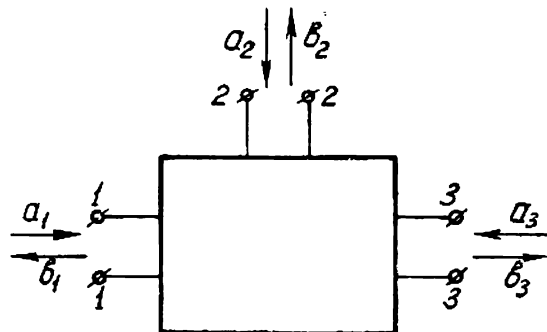


Рис. 1.

$$b_2 = - \frac{\Delta_{12} \cdot a_1^0}{\Gamma_1 \cdot \Delta}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{12}$  — алгебраическое дополнение определителя  $\Delta$ ;

$$\Delta = \begin{vmatrix} \Gamma_1 S_{11} - 1 & \Gamma_2 S_{12} & \Gamma_3 S_{13} \\ \Gamma_1 S_{21} & \Gamma_2 S_{22} - 1 & \Gamma_3 S_{23} \\ \Gamma_1 S_{31} & \Gamma_2 S_{32} & \Gamma_3 S_{33} - 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

— определитель матрицы нагруженного шестиполюсника;

$\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$  — коэффициенты отражения соответственно генератора, детекторной головки и измеряемой нагрузки;

$$a_1^0 = a_1 - \Gamma_1 b_1.$$

Определитель системы ( $\Delta$ ) не равен нулю, так как при неработающем СВЧ генераторе рассматриваемая система является пассивной. Пусть  $b_{2\text{мин}}$  и  $b_{2\text{макс}}$  соответствуют положению зонда измерительной линии в минимуме и максимуме стоячей волны. Если предположить, что собственно измерительная линия описывается исходной матрицей  $\hat{S}$ , когда зонд линии находится в максимуме стоячей волны, то при перемещении его в минимум стоячей волны, как показано в [5],  $\hat{S}$  изменится на  $\hat{S}'$  таким образом:

$$\hat{S}' = \hat{P} \hat{S} \hat{P},$$

где  $\hat{P}$  — диагональная матрица,  $k$ -тый диагональный член которой определяется выражением:

$$P_{kk} = e^{j2\pi \frac{l_k}{\lambda_k}}, \quad (4)$$

где  $\lambda_k$  — длина волны в  $k$ -той ветви шестиполосника;

$l_k$  — длина, на которую изменилось расстояние от места соединения шестиполосника до зажимов  $k-k$ .

В общем случае это преобразование справедливо для систем без потерь, но оно может быть применено и для систем с потерями при малых смещениях плоскости зажимов, когда потерями на участке смещения можно пренебречь.

В соответствии с (2), (3), (4) запишем измеренный КСВН:

$$k_{изм} = \left| \frac{b_{2\max}}{b_{2\min}} \right| = \left| \frac{\begin{vmatrix} S_{21}\Gamma_3 S_{23} & -\Gamma_1 S_{11} - 1 - j\Gamma_2 S'_{12} \Gamma_3 S_{13} \\ S_{31}\Gamma_2 S_{33} - 1 & -j\Gamma_1 S'_{21} \Gamma_2 S_{22} - 1 + j\Gamma_3 S'_{23} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \Gamma_1 S_{31} j \Gamma_2 S'_{33} - \Gamma_3 S_{33} - 1 \\ \Gamma_1 S_{11} - 1 & \Gamma_2 S_{12} & \Gamma_3 S_{13} \end{vmatrix}} \cdot \frac{\begin{vmatrix} -jS'_{21} j \Gamma_3 S'_{23} \\ S_{31} - \Gamma_3 S_{33} - 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \Gamma_1 S_{21} & \Gamma_2 S_{22} - 1 & \Gamma_3 S_{23} \\ \Gamma_1 S_{31} & \Gamma_2 S_{32} & \Gamma_3 S_{33} - 1 \end{vmatrix}} \right|. \quad (5)$$

Последнее справедливо, когда зонд незначительно искажает формулу поля стоячей волны, т. е. когда расстояние между соседними максимумом и минимумом стоячей волны равно четверти длины волны в волноводе, что без особого труда удовлетворяется на практике [6]. Штрихами обозначены коэффициенты передачи, модуль которых может изменяться при перемещении зонда линии из максимума в минимум. Уравнение (5) является исходным для определения предельных значений парциальных погрешностей измерительной линии. Метод поэлементного анализа погрешностей устройства весьма удобен при разработке измерительных устройств, так как при этом важно знать влияние того или иного источника погрешностей.

Из (5) видно, что измеренный КСВН ( $k_{изм}$ ) равен истинному ( $k_{ист}$ ) при следующих предположениях:

$$\Gamma_1 = \Gamma_2 = S_{33} = 0; \quad |S_{21}| = |S'_{21}| \quad \text{и} \quad \Gamma_3 \frac{S_{23} S_{31}}{S_{21}} = |\Gamma_3|.$$

Отсюда видно, что существует пять источников погрешности измерения КСВН. Для оценки влияния этих источников на погрешность измерения определим относительные парциальные погрешности. Максимально возможные значения этих парциальных погрешностей будут иметь следующий вид:

1. Погрешность, обусловленная отражениями со стороны генератора ( $\Gamma_1 \neq 0$ ):

$$\delta_1 = \frac{\pm 2 |\Gamma_1 S_{11}|}{1 - |\Gamma_1 S_{11}| - |\Gamma_1 \Gamma_3| |S'_{13}|^2}. \quad (6)$$

2. Погрешность, обусловленная отражением от детекторной головки ( $\Gamma_2 \neq 0$ ):

$$\delta_2 = \frac{+ 2 |\Gamma_2 \Gamma_3| \cdot |S'_{21}|^2}{1 - |\Gamma_2 S_{22}| - |\Gamma_2 \Gamma_3| |S'_{13}|^2}. \quad (7)$$

3. Погрешность за счет отражения от измерительной линии в сторону нагрузки ( $S_{33} \neq 0$ ):

$$\delta_3 = \frac{\pm 2 |\Gamma_3^2 S_{33}| (1 + |S_{33}|)}{(1 - |\Gamma_3| - |\Gamma_3 S_{33}|)(1 + |\Gamma_3 S_{33}|)(1 + |\Gamma_3|)} \quad (8)$$

4. Погрешность, обусловленная потерями в тракте ИЛ на участке зонд — нагрузочный фланец ( $|\frac{S_{23} S_{31}}{S_{21}}| \neq 1$ ):

$$\delta_4 = - \frac{2 |\Gamma_3| \left(1 - \frac{S_{23} S_{31}}{S_{21}}\right)}{\left(1 - \frac{|\Gamma_3 S_{23} S_{31}}{S_{21}}\right) (1 + |\Gamma_3|)} \quad (9)$$

5. Погрешность за счет непостоянства связи зонда линии с измерительным волноводом при перемещении каретки ( $|S_{21}| \neq |S'_{21}|$ ):

$$\delta_5 = \pm 2\delta |S_{21}| \quad (10)$$

Формулы (6), (9) и (10) совпадают с аналогичными выражениями [2 и 5]. Погрешность  $\delta_2$  в литературе ранее не рассматривалась. Погреш-

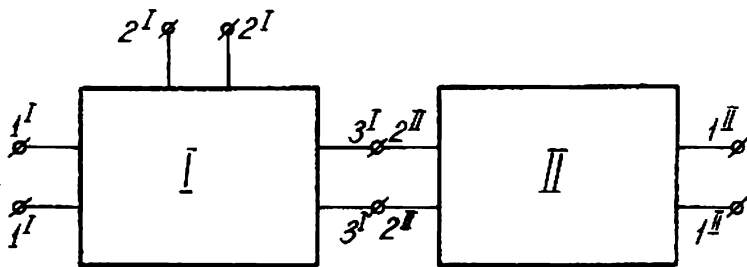


Рис. 2.

ность  $\delta_3$  учитывалась в виде погрешностей, обусловленных шунтирующим действием зонда и скачкообразным изменением поперечных размеров волновода измерительной линии в сечении фланца.

II. Измеритель КСВН с фазосдвигателем может быть представлен в виде последовательно соединенных шести- и четырехполосника (рис. 2).

Выражение общего члена матрицы рассеяния такого соединения нами было получено по методике, приведенной в [7]. Рассматриваемое соединение можно представить в виде результирующего шестиполосника, матрица рассеяния которого записывается так:

$$\left\| \begin{array}{ccc} S_{11}^I - \frac{S_{13}^I S_{22}^{II} S_{31}^I}{S_{23}^I S_{22}^{II} - 1} & S_{12}^I - \frac{S_{13}^I S_{22}^{II} S_{32}^I}{S_{23}^I S_{22}^{II} - 1} & - \frac{S_{13}^I S_{21}^{II}}{S_{23}^I S_{22}^{II} - 1} \\ S_{21}^I - \frac{S_{23}^I S_{22}^{II} S_{31}^I}{S_{23}^I S_{22}^{II} - 1} & S_{22}^I - \frac{S_{23}^I S_{22}^{II} S_{32}^I}{S_{23}^I S_{22}^{II} - 1} & - \frac{S_{23}^I S_{21}^{II}}{S_{23}^I S_{22}^{II} - 1} \\ - \frac{S_{31}^I S_{12}^{II}}{S_{23}^I S_{22}^{II} - 1} & - \frac{S_{32}^I S_{12}^{II}}{S_{23}^I S_{22}^{II} - 1} & S_{11}^{II} - \frac{S_{12}^I S_{33}^I S_{21}^{II}}{S_{23}^I S_{22}^{II} - 1} \end{array} \right\| \quad (11)$$

Используя (2), (3), (11) и методику, подобную описанной выше, получим выражения для максимальных значений парциальных погрешностей измерения КСВН этим устройством:

1. Погрешность, обусловленная отражениями со стороны генератора ( $\Gamma_1 \neq 0$ ):

$$\delta_1 = \frac{\pm 2 |\Gamma_1 \Gamma_3| |S_{13}^I|^2}{1 - |\Gamma_1 \Gamma_{11}^I| - |\Gamma_1 \Gamma_3| |S_{13}^I|^2}. \quad (12)$$

2. Погрешность, обусловленная отражением от детекторной головки ( $\Gamma_2 \neq 0$ ):

$$\delta_2 = \frac{\pm 2 |\Gamma_2 \Gamma_3| |S_{23}^I|^2}{1 - |\Gamma_2 S_{22}^I| - |\Gamma_2 \Gamma_3| |S_{23}^I|^2}. \quad (13)$$

3. Погрешность за счет отражения от зондовой головки в сторону фазосдвигателя ( $S_{33}^I \neq 0$ ):

$$\delta_3 = \frac{\pm 2 |\Gamma_3 S_{33}^I| (1 + S_{33}^I)}{(1 + |\Gamma_3 S_{33}^I|) (1 - |\Gamma_3| - |\Gamma_3 S_{33}^I|) (1 + |\Gamma_3|)}. \quad (14)$$

4. Погрешность, обусловленная отражением от фазосдвигателя в сторону зондовой головки ( $S_{22}^{II} \neq 0$ ):

$$\delta_4 = \frac{\pm 2 |\Gamma_3 S_{22}^{II}|}{(1 - |S_{22}^{II}| - |\Gamma_3|) (1 + |\Gamma_3|)}. \quad (15)$$

5. Погрешность, обусловленная отражением от фазосдвигателя в сторону измеряемой нагрузки ( $S_{11}^{II} \neq 0$ ):

$$\delta_5 = \frac{\pm 2 |\Gamma_3 S_{11}^{II}| (1 + |S_{11}^{II}|)}{(1 + |\Gamma_3 S_{11}^{II}|) (1 - |\Gamma_3 S_{11}^{II}| - |\Gamma_3|) (1 + |\Gamma_3|)}. \quad (16)$$

6. Погрешность, обусловленная потерями на участке волноводного тракта от зонда до нагрузки  $\left( \left| \frac{S_{31}^I S_{23}^I}{S_{21}^I} \right| \neq 1 \text{ и } |S_{12}^{II}| \neq 1 \right)$ :

$$\delta_6 = \frac{2 |\Gamma_3| \left( 1 - \left| S_{31}^I S_{12}^{II} \frac{S_{23}^I}{S_{21}^I} \right| \right)}{\left( 1 - \left| \Gamma_3 S_{31}^I S_{12}^{II} \frac{S_{23}^I}{S_{21}^I} \right| \right) (1 + |\Gamma_3|)}. \quad (17)$$

(При выводе выражений (15), (16) полагалось, что отражения от фазосдвигателя в положении индикации минимума и максимума стоячей волны равны по модулю).

Проанализируем выражения для погрешностей измерения КСВН с помощью ИЛ и с помощью зондовой головки и фазосдвигателя. Сравним выражения (6) и (12), видим, что в последнем к генератору СВЧ колебаний предъявляются более жесткие требования по согласованию с волноводным трактом. При этом согласование генератора должно быть тем лучше, чем больший КСВН необходимо измерять, в то время как в случае измерительной линии при измерении различных КСВН  $\delta_1$  (6) изменяется незначительно. На рис. 3 показана зависимость  $\delta_1$  от КСВН измеряемой нагрузки, рассчитанная по формуле (12) для случаев  $|S_{11}^I| = 0,025$ ;  $|\Gamma_1| = 0,05$  и  $|\Gamma_1| = 0,09$ . Для этих же двух случаев погрешность  $\delta_1$ , рассчитанная по формуле (6), при КСВН от 1 до 5 соответственно равна, примерно,  $\pm 0,2\%$  и  $\pm 0,5\%$ .

Эти результаты объясняются тем, что при работе с измерительной линией нагрузка генератора в процессе одного измерения очень мало

изменяется вследствие перемещения слабо отражающего зонда, а при изменении электрической длины между генератором и нагрузкой на  $\lambda_g/4$  это изменение весьма значительно. Последнее обстоятельство и приводит в случае устройства с фазосдвигателем к значительной погрешности за счет рассогласования генератора. Следует заметить, что при этом рассмотрении явление затягивания генератора не учитывалось.

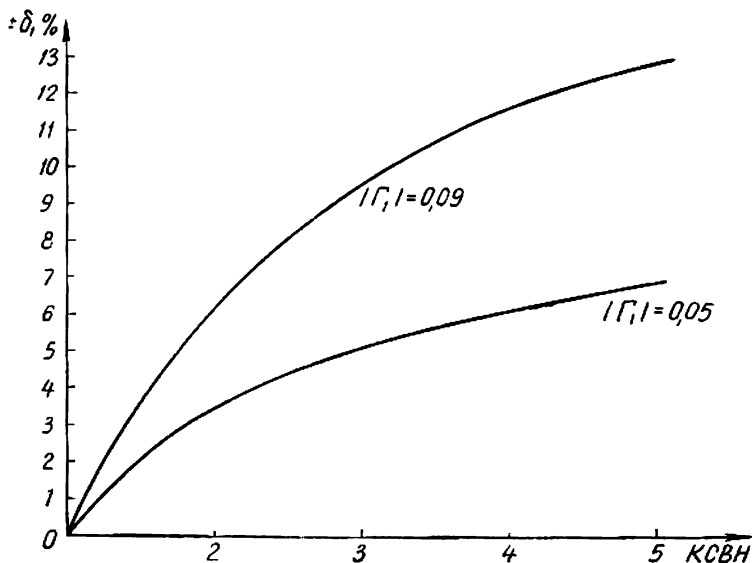


Рис. 3.

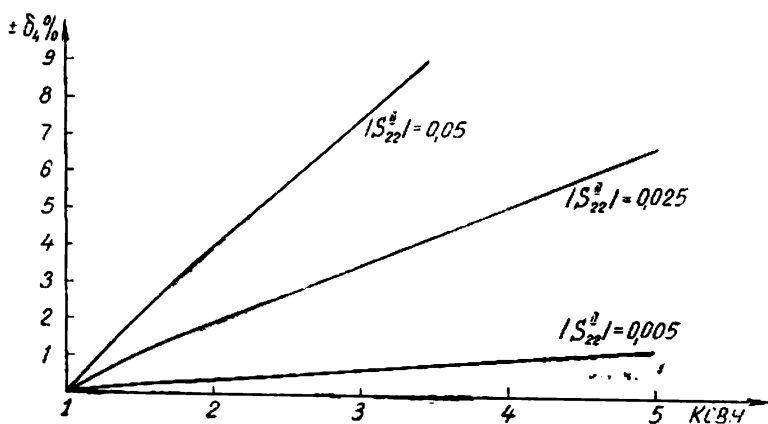


Рис. 4.

Выражения (7) и (13), (8) и (14) попарно внешне совершенно одинаковы, но величины соответствующих коэффициентов  $S_{ik}$  могут в основном в зависимости от конструктивного и технологического выполнения приборов несколько отличаться друг от друга. Однако величины погрешностей  $\delta_2$  и  $\delta_3$  вообще весьма малы (десятые доли процента), и небольшое отличие в  $S_{ik}$  не может существенно сказаться на них и тем более на

величине результирующей погрешности. Эти частные погрешности для обоих измерительных устройств можно считать попарно равными.

Погрешности, описанные выражениями (15) и (16), присущи только измерителю, состоящему из зондовой головки и фазовращателя. Величины этих погрешностей могут быть существенными особенно при измерении больших КСВН (рис. 4 и рис. 5). Так, при КСВН измеряемой нагрузки, равном 3, и  $|S_{22}^{11}| = |S_{11}^{11}| = 0,025$  эти погрешности равны следующим величинам:  $\delta_4 \approx \pm 3,5\%$ ;  $\delta_5 \approx \pm 0,9\%$ .

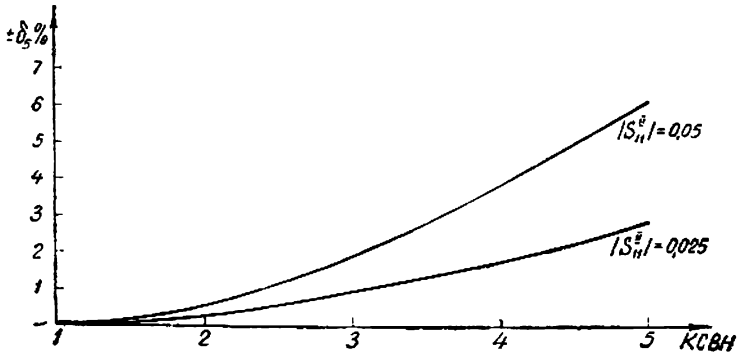


Рис. 5.

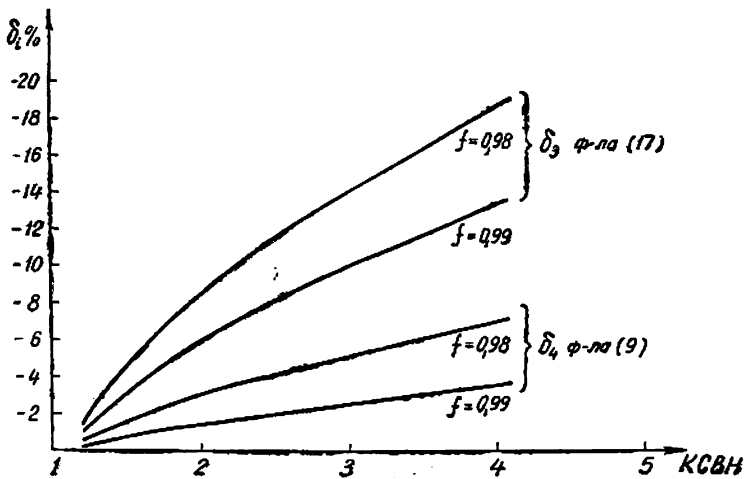


Рис. 6.

Погрешности, обусловленные потерями в волноводном тракте на участке зонд — нагрузочный фланец (9) и (17), присущи обоим измерителям. Однако величины их могут существенно различаться, если потери в фазосдвигателе значительны. Особенно велика разность между величинами этих двух погрешностей в коротковолновой части миллиметрового диапазона, где потери в диэлектрике велики. Если предположить, что

$$\frac{|S_{23}S_{31}|}{|S_{21}|} = \frac{|S_{23}^1 S_{31}^1|}{|S_{21}^1|} = f^2 \text{ и } |S_{12}^{11}|^2 = f^4$$

(случай, близкий к встречающимся на практике), то зависимости  $\delta_s = = f(KСВН)$ , рассчитанные по формулам (9) и (17), могут быть представлены графиками, изображенными на рис. 6.

Погрешность (10), обусловленная непостоянством связи зонда с измерительным волноводом при перемещении каретки, присуща только ИЛ. Величина этой погрешности, согласно проекту ГОСТа, на линии измерения для ИЛ третьего класса должна быть не более  $\pm 3\%$ .

Из сравнительного анализа частных погрешностей следует, что хотя погрешности того или иного конкретного измерителя рассмотренных двух типов существенно зависят от его конструктивного и технологического выполнения, измерительная линия является более точным прибором, а также что устройство с фазосдвигателем пригодно для измерения (с приемлемой точностью) только нагрузок с КСВН порядка 1,2 и менее.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. И. Переп. Измерение импедансов в диапазоне сантиметровых волн, М., Изд-во АН СССР, 1948.
2. Техника измерений на сантиметровых волнах. т. 1, под ред. Г. А. Ремеза, М., Изд-во «Сов. радио», 1951.
3. И. А. Коваленко. «Радиоэлектроника», 1957, № 15.
4. Теория линий передачи сверхвысоких частот. т. 1, под ред. А. И. Шпунтова, М., изд-во «Сов. радио», 1951.
5. М. Е. Герценштейн. «Измерительная техника», 1956, № 4, 37.
6. W. Altar, E. V. Marshall, L. Hunter. PIRE, v. 34, № 1, 1946.
7. Б. М. Машковцев. «Радиотехника», 1962, № 6.
8. Б. М. Машковцев. «Радиотехника», 1964, № 8.