

К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СВЧ МОЩНОСТИ ДЛЯ СРЕДНИХ И БОЛЬШИХ УРОВНЕЙ

В. Е. Коновалов

В связи с широким применением мощных генераторов СВЧ в научных исследованиях, народном хозяйстве и технике большое внимание уделяется совершенствованию контрольно-измерительной СВЧ-аппаратуры. В настоящее время актуальным остается вопрос измерения проходящей мощности больших уровней, непрерывной и импульсной. Среди многочисленных методов измерения СВЧ мощности представляет интерес метод, основанный на взаимодействии электронов в вакууме с полями СВЧ. Этот метод позволяет создавать относительно простые устройства для измерения электрических полей СВЧ, проходящей мощности больших и средних уровней, а также распределения мощности в импульсе.

В работе [1] описывается новый электронно-лучевой прибор для измерения проходящей СВЧ мощности в волноводе в импульсном и непрерывном режиме. Это устройство содержит ускоренный электронный пучок, проходящий поперечно через вакуумную секцию волновода с волной TE_{10} . Пролетное время электронов через волновод реализуется так, что взаимодействие электрического поля с электронами максимально. Для этого скорость пучка подбирается таким образом, чтобы пролетное время равнялось $(2n + 1)$ полупериодов СВЧ, где $n = 0, 1, 2 \dots$. Энергия, полученная электронами при полете по полю в течение одного полупериода, теряется в следующий полупериод, и максимальная энергия пучка имеет место, когда время пролета через волновод равно нечетному числу полупериодов СВЧ. Эта энергия измеряется посредством постоянного задерживающего потенциала, который может быть легко связан с СВЧ полем. Мощность затем подсчитывается по вектору Умова — Пойтинга. Приведенные в работе экспериментальные данные хорошо подтверждают теорию прибора, которым можно измерять высокие уровни непрерывной мощности, не изменяя ее при этом.

В работе [2] описано устройство, подобное примененному в [1] для контроля и измерения СВЧ мощности в коаксиальной структуре. Часть коаксиальной линии представляет диод, и мощность, пропускаемая вдоль линии, измеряется по разности потенциалов между внешним и внутренним проводниками коаксиала, возникающей при прохождении мощности. Данное устройство работает в диапазоне 8 мм, 3 см, 8,5 см и 10 см. Инерционность диода лучше, чем 0,001 мксек.

В настоящей работе рассмотрен новый метод, использующий электронно-лучевую технику для измерения проходящей мощности в прямоугольном волноводе.

Теоретическое обоснование метода измерения СВЧ мощности

Рассмотрим движение электрона в поле незамедленной основной волны прямоугольного волновода (TE_{10}). Траектория электронов лежит в плоскости максимального электрического высокочастотного поля. За начало координат выбирается точка влета электрона в пространство взаимодействия с СВЧ полем (рис. 1).

Не нарушая общности рассмотрения, предположим, что движение электрона и распространение волны происходит в направлении положительных z . При этом электрическое поле имеет вид

$$E_y = E_0 e^{i(\omega t - \alpha z)},$$

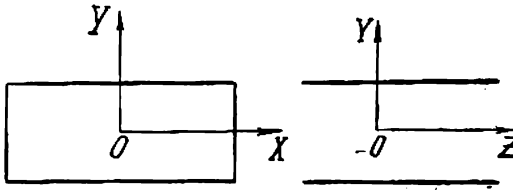


Рис. 1. Регулярный прямоугольный волновод.

где α — постоянная распространения электромагнитной волны;
 ω — круговая частота СВЧ колебаний.

Тогда уравнение движения записывается следующим образом:

$$\begin{cases} m\ddot{y} = eE_y = eE_0 \cos(\omega t + \varphi), \\ m\ddot{z} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где φ — фаза влета электрона;
 e — заряд электрона;
 m — масса электрона.

Поскольку рассматривается нерелятивистское движение электрона, то воздействие магнитной составляющей поля пренебрежимо мало в сравнении с электрической, и поэтому при написании силы Лоренца, член, содержащий магнитную составляющую, опускается.

При начальных условиях $\dot{y}|_{t=0} = 0$; $y|_{t=0} = 0$ и $\dot{z}|_{t=0} = v_0 = \sqrt{2}\tau v$, $z|_{t=0} = 0$ уравнение движения имеет следующее решение [3, 4].

$$\begin{aligned} y &= \frac{\tau E_0}{\omega^2} [\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi)] - \frac{\tau E_0 t}{\omega} \sin \varphi; \\ z &= v_0 t, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\tau = \frac{e}{m}$.

Эти два уравнения параметрически определяют траекторию электрона для времени, когда электрон подвергается воздействию со стороны поля бегущей волны. Хорошо видно, что траектория электрона плоская (лежит в плоскости YOZ) и что для любого момента влета электрона в пространство взаимодействия его путь изображается расположенной под некоторым углом к оси z прямой линией, на которую накладывается кривая поперечного осциллирующего движения. Таким образом, под действием электрической составляющей СВЧ поля бегущей волны происходит рассеяние электрона, т. е. отклонение от невозмущенной траектории.

Этот принцип может быть положен в основу метода измерения сверхвысокочастотной энергии, канализируемой по регулярным волноводным трактам.

Предположим, что некоторым образом введен в волновод электронный пучок, а затем на определенном расстоянии от места ввода пучок

выведен, причем ввод и вывод пучка реализуется так, чтобы потери тока за счет оседания электронов на стенках волновода равнялись нулю или были минимальны. При этих условиях естественно ожидать возрастание тока на волновод при прохождении через него одновременно электронного потока и СВЧ энергии. Следует отметить, что наибольший эффект будет, когда пучок проходит в максимуме электрической составляющей СВЧ поля.

Рассмотрим некоторые соображения о связи величины тока на волновод с амплитудой электрической составляющей поля и уровнем входящей мощности. Пусть монохроматический цилиндрический электронный пучок пролетает в волноводе определенное расстояние L , потенциал пучка — V , тогда время взаимодействия каждого электрона пучка с электромагнитным полем, согласно (2),

$$t = \frac{L}{\sqrt{2\eta V}}. \quad (3)$$

Если отсутствует пространственный заряд пучка, то плотность тока по радиусу будет постоянной, т. е.

$$i = \frac{I_n}{\pi r^2} = \text{const}, \quad (4)$$

где I_n — полный ток пучка,
 r — радиус пучка.

Будем считать также, что величина электрической составляющей поля по диаметру пучка постоянна и равна амплитуде. Тогда отклонение каждого электрона от невозмущенной траектории из (2) и (3) записывается так:

$$y = \frac{\eta E}{\omega^2} [\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi)] - \frac{\eta E_0 L}{\omega \sqrt{2\eta V}} \sin \varphi. \quad (5)$$

Поскольку пучок непрерывен и немодулирован, отклонение (5) принимает непрерывный ряд положительных и отрицательных значений. Отыскание тока на волновод сводится к точному учету всех отклонений электронов за пределы цилиндрической поверхности, соответствующей границе невозмущенного пучка. В силу того, что СВЧ осцилляции не могут быть отмечены индикатором тока (напряжения) в цепи волновод — катод, введем среднее отклонение за половину периода СВЧ колебаний:

$$y = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} y d\varphi = \frac{2\eta E_0}{\pi \omega^2} + \frac{2\eta E_0}{\pi \omega^2} (\cos \omega t + \sin \omega t) - \frac{2\eta E_0 L}{\pi \omega \sqrt{2\eta V}}. \quad (6)$$

В физически реализуемых случаях последнее слагаемое в (6) более, чем на два порядка превышает первые два. Следовательно, можно считать, что среднее отклонение

$$\bar{y} \cong \frac{2\eta L E_0}{\pi \omega \sqrt{2\eta V}} = \frac{L}{\pi \omega} \sqrt{\frac{2\eta}{V}} E_0. \quad (7)$$

Отсюда видно, что величина среднего отклонения пучка прямо пропорциональна амплитуде электрической составляющей поля, времени взаимодействия и обратно пропорциональна частоте электромагнитного поля.

Обозначим радиус невозмущенного пучка через r , а радиус апертуры диафрагмы (через которую осуществляется вывод пучка) — через R .

Под действием СВЧ поля пучок смещается по оси y относительно невозмущенной траектории на величину \bar{y} . Тогда величина тока на волновод определяется как произведение плотности тока пучка на площадь S , заштрихованную на рис. 2. Такой расчет можно считать нулевым приближением. Первым приближением следует считать расчет тока с учетом неоднородности плотности пучка по радиусу. В этом случае ток на волновод находится интегрированием функции $i = f(r)$ в области S (рис. 2).

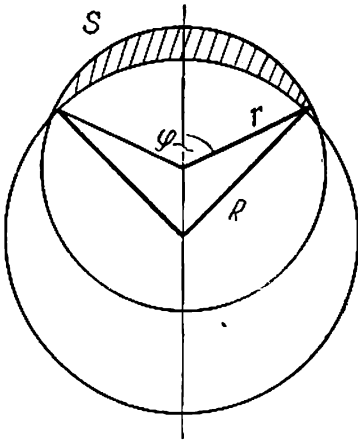


Рис. 2. Сечение электронного пучка и апертура выходной диафрагмы.

$$I = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\rho_1}^{\rho_2} i(\rho) \rho d\rho d\varphi, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 0; \\ \varphi_2 &= \arccos \frac{r^2 + \bar{y}^2 - R^2}{2ry}; \\ \rho_1(\varphi) &= -y \sin \varphi + \sqrt{R^2 - \bar{y}^2 \cos^2 \varphi}; \\ \rho_2(\varphi) &= r. \end{aligned} \quad (9)$$

Зависимость плотности тока пучка по радиусу может достаточно хорошо быть аппроксимирована следующими функциями:

$$i = A - Br^2; \quad i = A \cos ar; \quad i = Ae^{-ar}. \quad (10)$$

Приведем нулевое приближение для иллюстрации характера зависимости тока на волновод от амплитуды СВЧ поля. Оно получается из простых тригонометрических вычислений. Для $r < R$ ток на волновод, нормированный по току пучка, запишется так;

$$I = \frac{1}{2\pi} \left[\left| 2 \arccos \frac{R^2 - r^2 - y^2}{2yr} \right| - \sin \left| 2 \arccos \frac{R^2 - r^2 - y^2}{2yr} \right| \right] - \frac{R^2}{2\pi r^2} \left[\left| 2 \arccos \frac{R^2 - r^2 + y^2}{2yR} \right| - \sin \left| 2 \arccos \frac{R^2 - r^2 + y^2}{2yR} \right| \right]. \quad (11)$$

Для $r > R$ ток на волновод:

$$I = \frac{1}{2\pi} \left[\left| 2 \arccos \left(-\frac{r^2 - R^2 + y^2}{2yr} \right) \right| - \sin \left| 2 \arccos \left(-\frac{r^2 - R^2 + y^2}{2yr} \right) \right| \right] - \frac{R^2}{2\pi r^2} \left[\left| 2 \arccos \left(-\frac{r^2 - R^2 - y^2}{2yR} \right) \right| - \sin \left| 2 \arccos \left(-\frac{r^2 - R^2 - y^2}{2yR} \right) \right| \right]. \quad (12)$$

Для $r = R$ ток на волновод:

$$I = \frac{1}{2\pi} \left[\left| 2 \arccos \left(-\frac{y}{2R} \right) \right| - \sin \left| 2 \arccos \left(-\frac{y}{2R} \right) \right| - 2 \arccos \frac{y}{2R} + \sin 2 \arccos \frac{y}{2R} \right]. \quad (13)$$

В (11), (12) и (13) y — среднее отклонение пучка (7). Решение определено в интервале значений y . Так, для (11) $R - r \leq y \leq R + r$, для (12) $r - R \leq y \leq y + R$ и для (13) $0 \leq y \leq 2R$.

На рис. 3 показана зависимость нормированного тока на волновод как функция амплитуды СВЧ поля, рассчитанная по (13) для конкретного случая ($L = 65$ мм, $V = 500$ в, $f = 10$ Гц). На рисунках 4 и 5 показаны зависимости нормированного тока на волновод от проходящей

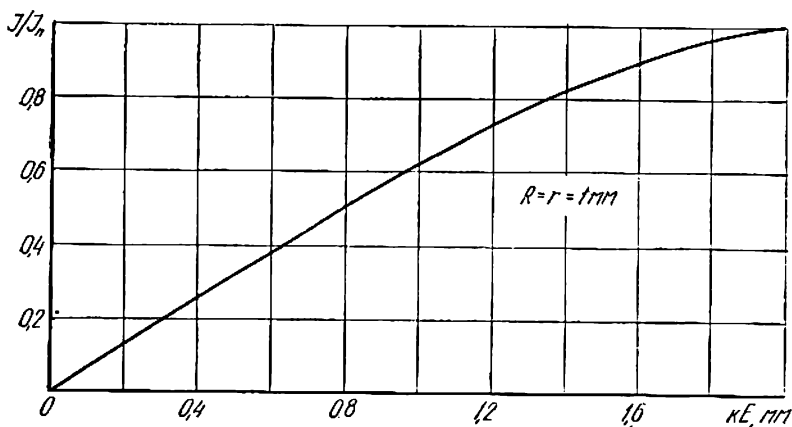


Рис. 3. Зависимость нормированного тока от амплитуды СВЧ поля.

мощности при фиксированной частоте и от частоты при фиксированном уровне проходящей мощности соответственно, рассчитанные по (13). Из этих рисунков хорошо видна физическая реализуемость данного метода измерения проходящей мощности СВЧ.

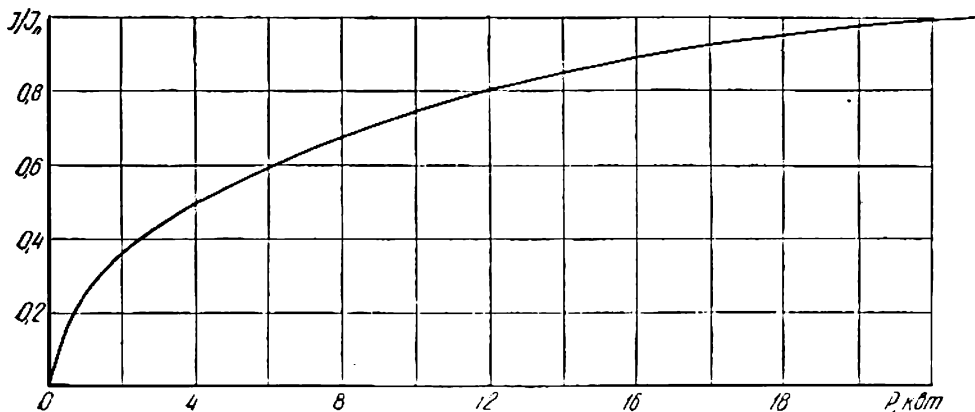


Рис. 4. Зависимость нормированного тока от проходящей мощности в прямоугольном волноводе.

Из описанного выше теоретического рассмотрения метода измерения СВЧ мощности можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность применения эффекта размывания электронного пучка полем бегущей волны для измерения проходящей мощности.

2. Данный метод позволяет конструировать измерители мощности, импульсной и непрерывной, на различные пределы измерения, от десятков ватт до сотен киловатт и выше.

3. Благодаря малой инерционности, определяемой временем пролета пучка через волновод, можно контролировать импульсы в наносекундной области, измерять мощность одиночных импульсов и распределение мощности в них.

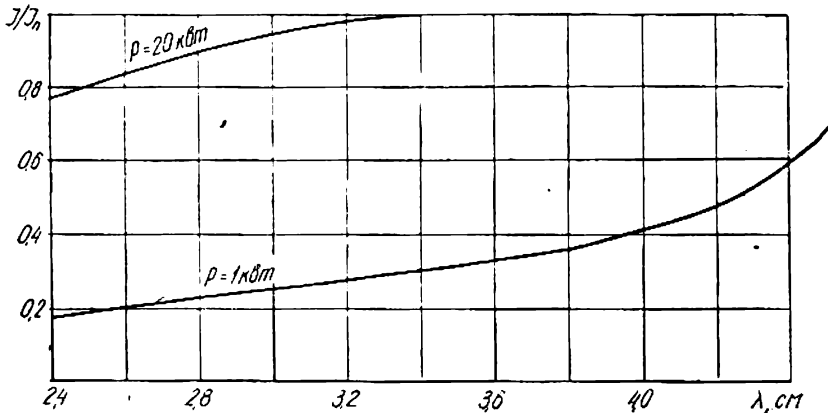


Рис. 5. Зависимость нормированного тока от частоты.

4. Использование протяженного пучка в значительной степени снижает ошибку в измерении проходящей мощности, обусловленной величиной КСВ в тракте. Так, в работе [1] максимальная ошибка определяется выражением $\delta = (\text{КСВ} - 1) 100\%$. Для пучка протяженностью $\sim \frac{\lambda_{\text{в}}}{4}$ и более в данном методе $\delta = \frac{(\text{КСВ} - 1)^2}{4 \text{ КСВ}} \cdot 100\%$.

5. Учет допущений, используемых при рассмотрении метода, позволяет создать самоградуирующееся устройство, измеряющее мощность в легко определяемых величинах частоты и тока (напряжения).

6. Экспериментальная проверка подтвердила реализуемость метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Harold A. Thomas, PIRE, 45, 2, 205, 1957.
2. W. J. Hoskin. PIRE, 45, 9, 1285, 1957.
3. В. Ф. Коваленко. Введение в электронику СВЧ, М., изд-во «Сов радио», 1955.
4. Электронные лампы, т. II, М., Изд-во «Сов. радио», 1954.