

Министерство образования  
Государственный Технический Университет

# Реферат

по теме: **Определение оптимальных размеров датчика СВЧ  
поверхностных волн (П.В.) на основе меандровой линии замедления (Л.З.)**

**Облокулов А.**

Датчик ПВ сигнала на основе меандровой ЛЗ (плоская линейная спираль) характеризуется следующими размерами (рис. 1):

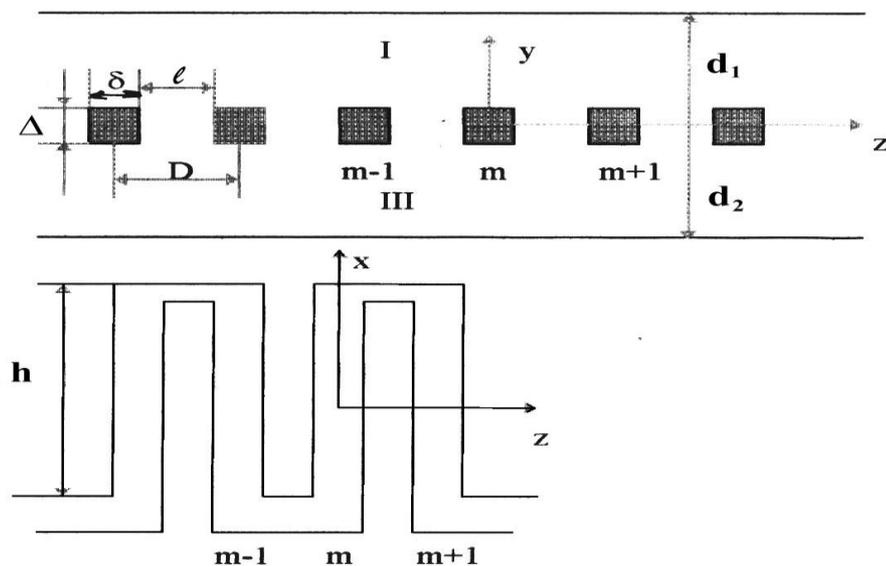


рис. 1. Меандровая линия замедления

$h$  - ширина,

$L$  - длина,

$2D$  - период,

$D$  - ячейка ( шаг ) системы ,

$l$  - зазор между проводниками,  $\delta$  и  $\Delta$  - ширина и толщина проводника,

$d_1$  и  $d_2$  - расстояние от центра системы до экранов.

Составляющие полей получены в [1] при использовании следующих приближений

- 1) вдоль проводников распространяется ТЕМ волна;
- 2) проводимость проводников и экранов бесконечна;
- 3)  $l \ll h$  , т.е. краевыми полями пренебрегаем;
- 4) система неограниченна в направлении  $z$  и проводники имеют квадратное сечение.

Полагая, дополнительно, что система погружена в непроводящий диэлектрик с проницаемостью  $\epsilon$  и электрическое поле однородно, нормально к проводникам и не зависит от толщины проводника  $\Delta$  получаем выражения для составляющих магнитных полей в виде (в системе единиц СИ).

$$\text{I область } \frac{\Delta}{2} \leq y \leq d_1 :$$

$$\begin{aligned}
H_{z1} &= -E_0 \sqrt{\varepsilon l / (\rho D)} \left[ \operatorname{tg} kh / 2 \sin kx \sum_n (-1)^n B'_{n1} f'_n e^{-j\beta' nz} - j \cos kx \sum_n (-1)^n B''_{n1} f''_n e^{-j\beta'' nz} \right], \\
H_{y1} &= jE_0 \sqrt{\varepsilon l / (\rho D)} \left[ \operatorname{tg} kh / 2 \sin kx \sum_n (-1)^n A'_{n1} f'_n e^{-j\beta' nz} - j \cos kx \sum_n (-1)^n A''_{n1} f''_n e^{-j\beta'' nz} \right].
\end{aligned} \quad (1)$$

II область  $-\Delta/2 \leq y \leq \Delta/2$ :

$$H_{y2} = jE_0 \sqrt{\varepsilon / \rho} \left[ \operatorname{tg} kh / 2 \sin kx e^{-jm\varphi} + j \cos kx e^{-jm(\varphi-\pi)} \right] e^{-j\varphi/2}, \quad (2)$$

$$H_{z2} = H_{x2} = 0$$

III область  $-d_2 \leq y \leq -\Delta/2$ :

$$\begin{aligned}
H_{z3} &= -E_0 \sqrt{\varepsilon l / (\rho D)} \left[ \operatorname{tg} kh / 2 \sin kx \sum_n (-1)^n B'_{n3} f'_n e^{-j\beta' nz} - j \cos kx \sum_n (-1)^n B''_{n3} f''_n e^{-j\beta'' nz} \right], \\
H_{y3} &= jE_0 \sqrt{\varepsilon l / (\rho D)} \left[ \operatorname{tg} kh / 2 \sin kx \sum_n (-1)^n A'_{n3} f'_n e^{-j\beta' nz} - j \cos kx \sum_n (-1)^n A''_{n3} f''_n e^{-j\beta'' nz} \right] H_{x3} = 0.
\end{aligned} \quad (3)$$

где  $A'_{n1} = \operatorname{Sh}\beta'_n(d_1 - y) / [\operatorname{Sh}\beta'_n(d_1 - \Delta/2)]$ ,  $B'_{n1} = \operatorname{Ch}\beta'_n(d_1 - y) / [\operatorname{Sh}\beta'_n(d_1 - \Delta/2)]$ ,  
 $A'_{n3} = \operatorname{Sh}\beta'_n(d_2 + y) / [\operatorname{Sh}\beta'_n(d_2 - \Delta/2)]$ ,  $B'_{n3} = \operatorname{Ch}\beta'_n(d_2 + y) / [\operatorname{Sh}\beta'_n(d_2 - \Delta/2)]$ . (4)

$f'_n = \frac{\sin \beta'_n \ell / 2}{\beta'_n \ell / 2}$ ; m - номер проводника,  $k = \sqrt{\varepsilon} 2\pi / \lambda$ ,

$\beta'_n = (\varphi + 2\pi) / D$  и  $\beta''_n = (\varphi - \pi + 2\pi m) / D$  - волновые числа n-й

пространственной гармонике с набегом фазы на ячейку  $\varphi$  и  $\varphi - \pi$

соответственно, коэффициенты  $A''_{n1}$ ,  $A''_{n3}$ ,  $B''_{n1}$ ,  $B''_{n3}$  и  $f''_n$  аналогичны (4) с заменой  $B'_n$  на  $B''_n$ ,  $\rho$  - волновое сопротивление свободного пространства,  $E_0$  - постоянная.. Компоненты электрического поля имеют аналогичный вид, если в квадратных скобках  $\sin kx$  и  $\cos kx$  заменить на  $\cos kx$  и  $\sin kx$  соответственно.

В датчиках ПВ можно использовать как составляющую поля  $H_z$  так и  $H_y$ , которые при удаленных экранах равны. Амплитуду магнитного поля находим из выражения для потока энергии переносимого вдоль системы (выраженного через групповую скорость и энергию запасенную в ячейке):

$$|H_{z1a}|^2 = \sqrt{\varepsilon P_0} / (\rho D^2) [F_{1n}(x, y) / T_n + F_{2n}(x, y, z) / T_n], \quad \text{где} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
F_{1n}(x, y) &= \operatorname{tg}^2 kh/2 \sin^2 kx \sum_n (B'_{n1} f'_n)^2 + \cos^2 kx \sum_n (B''_{n1} f''_n)^2, \\
F_{2n}(x, y, z) &= \operatorname{tg}^2 kh/2 \sin^2 kx \sum_{n \neq s} \sum [B'_{n1} f'_n B'_{s1} f'_s \sin(n-s)\pi z/D] - \\
&\quad - \operatorname{tg} kh/2 \sin kx \sum_{n \neq s} \sum [B''_{n1} f''_n B'_{s1} f'_s \sin[(n-s)+1]\pi z/D] + \\
&\quad + \cos^2 kx \sum_{n \neq s} \sum [B''_{n1} f''_n B''_{s1} f''_s \cos(n-s)\pi z/D], \\
T_n &= 0,5 \sin kh \left[ \operatorname{ctg}^2 kh/2 \sum_n (M'_n F'_n + f_n'^2 N'_n) - \sum_n (M''_n F''_n + f_n''^2 N''_n) \right], \quad (6)
\end{aligned}$$

$$M'_n = [Cth\beta'_n(d_1 - \Delta/2) + Cth\beta'_n(d_2 - \Delta/2)] f_n'^2 / \beta'_n D,$$

$$F'_n = 1/(\beta'_n D) \left( 3 - 2 \frac{\beta'_n l/2}{\operatorname{tg}\beta'_n l/2} \right),$$

$$N'_n = 1/(\beta'_n D) \left( \frac{(d_1 - \Delta/2)/D}{Sh^2 \beta'_n (d_1 - \Delta/2)} + \frac{(d_2 - \Delta/2)/D}{Sh^2 \beta'_n (d_2 - \Delta/2)} \right).$$

аналогичны  $F''_n$ ,  $N''_n$  и  $M''_n$  с заменой  $\beta'_n$  на  $\beta''_n$ .

$P_0$  - мощность СВЧ, подаваемая к ЛЗ.

Из (5) следует, что амплитуда магнитного поля определяется суммой двух функций  $F_{1n}$  и  $F_{2n}$ . Функция  $F_{1n}$  описывает поле в поперечной плоскости ХОУ и дает среднее значение магнитного поля над поверхностью системы. Причем когда  $kh/2 \rightarrow \pi/2$  ( $\lambda \rightarrow 2h\sqrt{\varepsilon}$ , широкий меандр, короткие волны) преобладает синусная составляющая поля, когда  $kh/2 \rightarrow 0$  ( $\lambda \gg 2h\sqrt{\varepsilon}$ , узкий меандра длинные волны) преобладает косинусная составляющая поля. Функция  $F_{2n}$  описывает периодическую часть поля вдоль координаты Z.

Сигнал датчика ПВ пропорционален среднеквадратичному значению напряженности магнитного поля в образце, который можно выразить через коэффициент преобразования мощности в поле (6)

$$\xi = 1/(V_0 P_0) \int_{V_0} H^2 dV \quad (V_0 - \text{объем образца}). \quad \text{В случае меандровой ЛЗ он равен}$$

(при  $L = 2mD$ ):

$$\xi = \sqrt{\varepsilon} / (\rho D^2) F_{1n}^0 / T_n, \quad \text{где} \quad (7)$$

$$F_{1n}^0 = 1/2 \left[ (1 - \sin kh/(kh)) \operatorname{tg}^2 kh/2 \sum_n (\bar{B}'_{n1} f_n'^2) + (1 - \sin kh/(kh)) \sum_n (\bar{B}''_{n1} f_n''^2) \right]$$

$$\bar{B}'_{n1} = \frac{1}{2 \operatorname{Sh}^2 \beta'_n (d - \Delta/2)} \left( \frac{\operatorname{Sh} \beta'_n t}{\beta'_n t} \operatorname{Ch} \beta'_n [2(d - \Delta/2) - t] - 1 \right)$$

$B''_{n1}$  аналогично  $B'_{n1}$  с заменой  $\beta'_n$  на  $\beta''_n$ ,  $t$  - толщина образца.

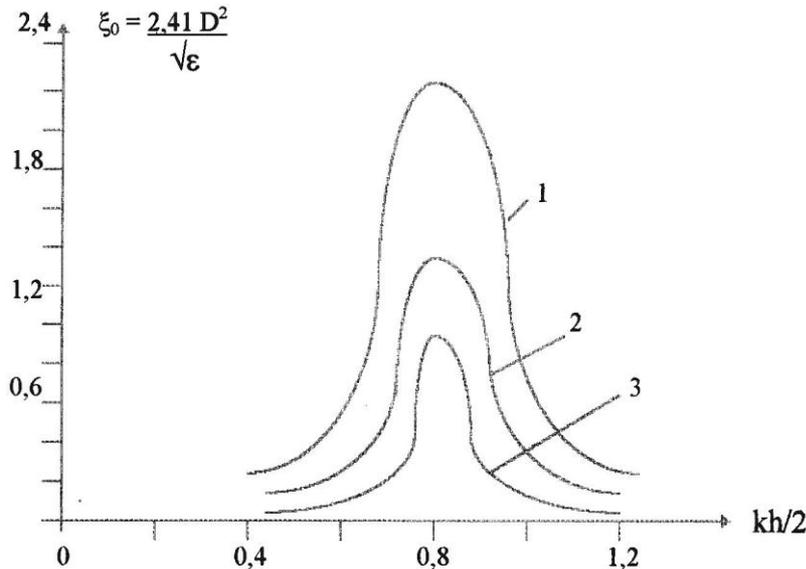


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования мощности в поле для объемного образца от параметра  $kh/2$ . Кривые 1, 2 и 3 соответствуют толщинам образца  $t = 0, D/4$  и  $D/2$ . Здесь  $\xi_0$  - в  $\text{э}^2/\text{вт}$ ,  $D$  - в мм.

Зависимость  $\xi$ , от параметра спирали  $kh/2$  представлена на рис.2 ( $\xi$  - в  $\text{э}^2/\text{вт}$ ,  $D$  - в мм) и была вычислена при следующих предположениях

- 1) экраны удалены;
- 2) система симметрична, т.е.  $\delta = \Delta = D/2$ .

Поскольку про  $(d - \Delta/2)/t \gg 1$  ряды (7) сходятся, как  $n^{-p}$  с  $p \geq 3$ , в расчете учитывались только члены с  $n = 0; \pm 1$  (члены ряда с  $n = \pm 2$  не превышали 5% от нулевого). Функция  $f_{1n}^0$  и  $T_n$  рассчитывалась с учетом дисперсионной характеристики системы (5), построенной в координатах  $kh/2, \varphi$ . Из рис.2, в частности, следует, что при  $D=0,4$  мм,  $\epsilon=2,6$ ,  $\lambda=3,2$  см коэффициент преобразования (в точке максимума  $kh/2 \approx 0,8$ ) равен  $\sim 5 \text{ э}^2/\text{вт}$  для образца толщиной 0,1мм и примерно  $9 \text{ э}^2/\text{вт}$  на поверхности системы.

Для определения оптимальных геометрических размеров датчика найдем его чувствительность в зависимости от параметров спирали и толщины образца.

Полагая детектирование линейным и что спираль и детектор идеально согласованны с СВЧ трактом образец находится с одной стороны спирали и равен ее длине и ширине и мощность СВЧ, поглощаемая в момент резонанса, мала в сравнении с подводимой. приходим к выражению:

$$\Delta U_{g0} = 2B\chi''(L/D)(kh/2)(t/D)(F_{1n}^0/T_n), \quad (8)$$

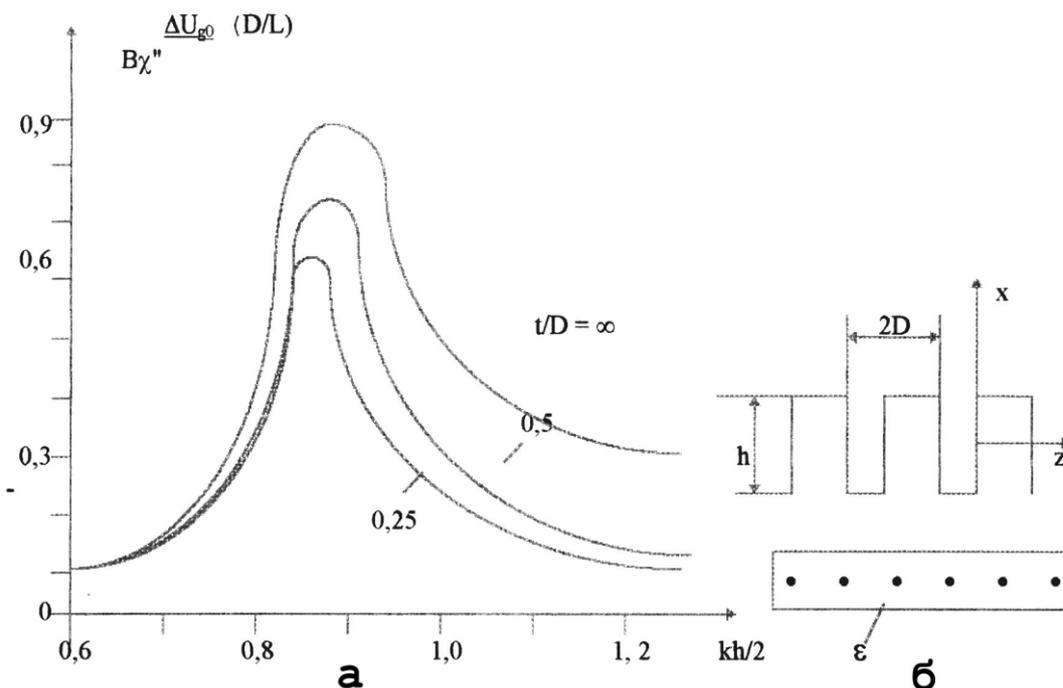


Рис.3. Зависимость чувствительности датчика от параметров меандровой ЛЗ ( $kh/2$ ) и отношения толщины образца  $t$  к шагу спирали  $D$ .

Где  $B = 0,25\sqrt{GR_g P_0}$ ,  $G, R_g$  – коэффициенты преобразования и сопротивление детектора,  $P_0$  – мощность СВЧ, подводимая к датчику,  $\Delta U_{g0}$  – изменение напряжения на детекторе СВЧ при резонансе,  $\chi''$  – мнимая часть магнитной восприимчивости,  $\delta$  – меандровая ЛЗ. График выражения (8), для симметричной меандровой ЛЗ, представлен на рис.3, из которого находим оптимальную ширину датчика. Максимальную толщину образца и, следовательно, шаг спирали можно оценить из расстояния  $s$ , на котором поле ослабляется в "е" от поверхности системы (7)

$t \sim s = \lambda / 2\pi \sqrt{n_z^2 - \epsilon}$ , где коэффициент замедления  $n_z$  является, полагая, геометрическим  $n_z = (0,5 + h/D)\sqrt{\epsilon}$ .

Определенная таким образом величина  $t$  может в  $1,5 \div 5$  раз отличается от истинного значения поскольку, в данном случае, не учитывается двуволновый характер системы (система "меандр" является двухступенчатой структурой [2]).

Более точное значение  $t$  можно найти, построив по рис.3 зависимость чувствительности датчика от объема образца (при заданном  $D$  и  $kh/2$ ).

Оптимальная длина спирали при наличии потерь, равна  $L_{opt} = I/\alpha$ , где постоянная затухания  $\alpha$  находится экспериментально (расчет  $\alpha$  не дает удовлетворительного численного совпадения с экспериментальными данными).

## КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА ПВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

На рис.4 приведена конструкция датчика, изготовленная следующим образом. На заготовку из оргстекла ( $\varepsilon = 2,6$ ) наносят параллельные канавки с шагом  $D$  и глубиной равной диаметру провода. Затем на заготовке вырезают пластинки (5) шириной  $h$  и поверх канавок накладывается медная пластинка. В образовавшееся отверстие продевается зигзагообразный медный провод, пластинка прогревается (до размягчения оргстекла) и удаляется.

Изготовленные меандровые ЛЗ имели размеры  $L=10$  мм,  $h = 4,5 \div 9,5$  мм с шагом  $D = 0,4$  мм и  $0,6$  мм. Подвод и отвод мощности СВЧ осуществлялся с помощью радиочастотного кабеля (3) РК-75-2-26, КСВ(Н) датчиков с  $h \leq 6$  мм не превышал 2,5 в диапазоне  $8,3 \div 10,2$  ГГц при наличии согласующего экрана в виде усеченного конуса (4). Датчики с размерами  $h = 9$  мм и  $9,5$  мм имели граничную частоту в области 8 ГГц хорошо совпадающего со значением, найденным по дисперсионным характеристикам. Измеренные методом замещения постоянные затухания датчика (на  $\lambda = 3,2$  см) равны 3,6 дБ/см ( $h = 4,5$  мм,  $D = 0,4$  мм) и 6,2 дБ/см ( $h = 6$  мм,  $D = 0,4$  мм).

Полоса пропускания, определенная по частотной характеристике датчика ПВ, превышает 1500 МГц для датчиков с  $h \leq 6$  мм, что позволяет использовать их при контроле структуроскопии и дефектоскопии.

Измеренная зависимость сигнала датчика ЭПР (рис.5) от объема образца и высоты его расположения над поверхностью спирали (образец толщиной 0,07 мм) показывает, что для датчика с  $h = 4,5$  мм и  $h = 6$  мм и шагом  $D = 0,6$  мм предельный объем образца равен  $7$  мм<sup>3</sup> и  $17$  мм<sup>3</sup> соответственно (при одностороннем расположении образца), а амплитуда сигнала датчика ПВ уменьшается в "е" раз на высоте  $\sim 0,1$  мм и  $\sim 0,17$  мм для меандровых линий с  $h = 4,5$  мм и  $h = 6$  мм соответственно. Большая скорость спада поля с высотой для меандровой ЛЗ с меньшей шириной, по-видимому, является следствием

двухступенчатой структуры "меандра". Это подтверждается тем, что экспериментальные зависимости достаточно хорошо совпадают с вычисленными по данным рис.3, который был построен с учетом двуволного характера системы. Масштаб экспериментальных кривых и расчетных точек на рис.4 выбран так, чтобы найденные и рассчитанные значения для ЛЗ с  $h = 4,5$  мм совпадали при  $V_0 = 21$  мм<sup>3</sup> для ЛЗ с  $h = 6$  мм при  $t/D = 0,5$ .

Измеренная чувствительность датчиков (при направлении постоянного магнитного поля  $H_0$  ортогонально плоскости XZ "меандра") с  $h = 4,5$  мм и  $h = 6$  мм примерно совпадает (с учетом потерь) с чувствительностью объемного резонатора ( $Q_H = 4000$ ) для образцов объемом 3,3 мм<sup>3</sup> и 4,3 мм<sup>3</sup>. Расчетное значение получается в  $\sim 2,5$  раза завышенным, что по-видимому, связано с тем, что при расчете не учитывались краевые поля и, кроме того, у изготовленных спиралей проводники не были строго параллельны.

На датчике с меандров ой ЛЗ были проведены предварительные измерения на дефектоскопе диапазона (площадь образца при двухстороннем расположении составляла  $\sim 90$  мм<sup>2</sup> при толщине 0,05 мм) и показана возможность его использования в диапазоне волн меньше 1 см. Это открывает перспективы использования этого датчика для структуроскопических работ в 8 мм диапазоне, т.к. система является полностью открытой.

Интересной особенностью датчика на основе меандровой ЛЗ является изменение интенсивности сигнала ПВ (примерно в 9 раз на изготовленных датчиках) при изменении направления постоянного магнитного поля  $H_0$ , когда последние перпендикулярно плоскости XY "меандра". Это связано с наличием круговой поляризации магнитного СВЧ поля в этой плоскости, причем, как показывает расчет (уравнения (1) и (4)) и эксперимент, направление вращения магнитного вектора противоположно по разные стороны от поверхности "меандра", что в свою очередь позволяет выделить чистый сигнал от образца и подавлять сигнал от подложки.

Из полученных данных следует, что меандровые ЛЗ могут служить датчиками сигнала ПВ для плоских образцов толщиной  $\sim 0,1 - 0,2$  мм в 3 см диапазоне волн, объемов  $\sim 30$  мм<sup>3</sup> и площади  $\sim 300$  мм<sup>2</sup> (в отсутствие диэлектрика). Для сравнения укажем, что в случае объемного резонатора  $V_0 \sim 500$  мм<sup>3</sup> и  $S_0 \sim 300$  мм<sup>2</sup>. При этом, однако, следует отметить важные преимущества датчиков плоской конструкции:

- 1) плоские ЛЗ являются полностью открытыми;
- 2) в противоположность объемным резонаторам, когда образец помещается внутрь датчика, в случае плоских ЛЗ можно помещать датчик на образец;
- 3) использовать датчики в качестве объемного зонда;

- 4) упростить термостатирование образца в широком диапазоне температур (от высоких до сверхнизких) при одновременном облучении образца;
- 5) исследовать не только ровные плоские поверхности, но и поверхности с гладкой кривизной;
- 6) использовать интегральные СВЧ схемы, что особенно перспективно при низкотемпературных измерениях и при создании малогабаритных структуроскопов на основе интегральных схем.

Существенным недостатком датчиков на основе ЛЗ, по сравнению с объемными резонаторами, является наличие электрического поля в объеме образца. Однако, их использование, наряду с объемными резонаторами, позволяет значительно расширить экспериментальные возможности структуроскопии.

#### Литература

1. Г.Л. Соболев, А.А. Хоркина, Вопросы электроники сверхвысоких частот, 1969, 6, 152. Изд. Саратовского ун-та.
2. Р.А. Силин, В.П. Сазонов, Замедляющие системы, Изд. "Сов. радио", 1960.