

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЛБВМ

Е. И. Шматько, Н. Н. Жданов

Харьков

Несмотря на успехи, достигнутые в области разработки и проектирования ЛБВ М-типа, они еще не полностью удовлетворяют предъявляемые к ним требования по широкополосности и

рабочим напряжениям. Поэтому исследования замедляющих систем, позволяющих решить поставленные проблемы, представляют интерес. Наиболее перспективными остаются встречно-штыревые волноводные системы, описанные в работах [1, 2, 3], однако приведенные там результаты не дают ответа на многие практические вопросы. В работе [4] приводятся результаты электродинамического расчета дисперсионных характеристик и амплитудного спектра системы, имеющей одинаковую ширину замедляющей системы и широкой стенки волновода. Но в реальных приборах ширина пространства взаимодействия обычно больше, чем ширина замедляющей системы.

Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию влияния пространства взаимодействия на дисперсионные характеристики и сопротивление связи волно-

водной встречно-штыревой замедляющей системы, у которой ширина пространства взаимодействия больше ширины петляющего волновода (рис. 1) и возможности использования ее в ЛБВ М-типа.

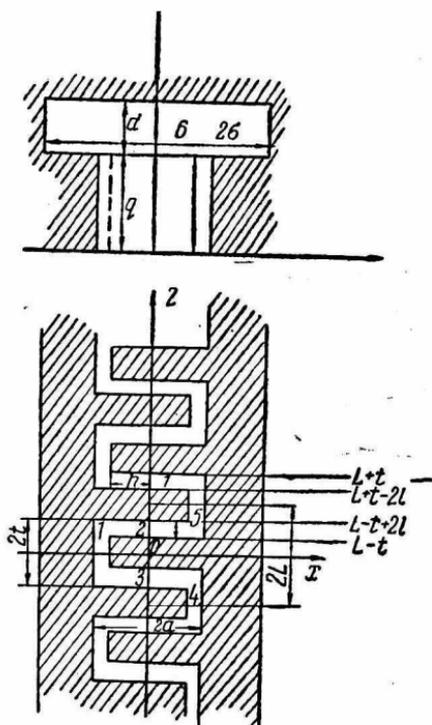


Рис. 1. Волноводная встречно-штыревая замедляющая система.

Электродинамические характеристики данной замедляющей системы рассчитываются по методике, описанной в работе [4].

Полученные дисперсионные уравнения имеют следующий вид:

$$-\operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{(b_{11}^2 - b_{12}^2)(b_{22}^2 - b_{21}^2)}{(b_{11}b_{22} - b_{21}b_{12})^2}; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\nu}{1-\nu} \left[\kappa^2 - \left(\frac{\pi}{2\sigma} \right)^2 \right] \sin^2 \theta_q \sum_{s=-\infty}^{\infty} |L_{sm}|^2 \frac{\operatorname{ctg} \gamma_s d}{\gamma_s} = \\ & = 2\sigma q h [\alpha^2 (Q + Q_1) + \theta^2 (N + N_1)] + 4\sigma q \nu \delta \times \\ & \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{|A_m|^2 \Gamma_m \cos^2 a h}{\delta_m |\rho_m \sin \rho_m \delta|^2} \left(\frac{\sin \pi m \nu}{\pi m \nu} \right)^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Соотношение (1) полностью совпадает с формулой (4) из [4], а (2) отличается тем, что оно учитывает ширину волноводной части 2σ , не равную ширине, изогнутого волновода $2a$. В связи с этим видоизменяются и дополнительные соотношения, входящие в (2):

$$s_m = \frac{2\rho_m}{\rho_m - \left(\frac{\pi}{2\sigma}\right)^2} \left(c_s \rho_m \delta \cos \frac{\pi h}{2\sigma} - \frac{\pi}{2\sigma} \sin \rho_m \delta \sin \frac{\pi h}{2\sigma} - \cos \frac{\pi a}{2\sigma} \right);$$

$$\begin{aligned} L_{sm} = R h \frac{\sin \beta_s l}{\beta_s l} [1 + (-1)^s \Phi_2 \cos \varphi] - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2s_m \beta_s \sin \left(\beta_s l + \frac{\pi m}{2} \right)}{\delta_m l \left[\beta_s^2 + \left(\frac{\pi m}{2l} \right)^2 \right]} \times \\ \times \frac{\cos a h}{\sin \rho_m \delta} T \frac{\sin \pi m \nu}{\pi m \nu}; \end{aligned}$$

$$\operatorname{Re} A_m = 1 + (-1)^m \cos^2 \varphi [1 + \Phi_1 \operatorname{tg} a h \operatorname{tg}^2 \varphi] \Phi_2;$$

$$\operatorname{Im} A_m = \Phi_1 \operatorname{tg} a h \operatorname{tg} \varphi + (-1)^m \frac{\sin 2\varphi}{2} \Phi_2 [1 - \Phi_1 \operatorname{tg} a h];$$

$$\Phi_1 = \frac{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}}{b_{22}^2 - b_{21}^2}; \quad \Phi_2 = \frac{b_{11}b_{21} - b_{22}b_{12}}{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}};$$

$$Q_1 = Q |\Phi_2 \cos \varphi|^2; \quad N_1 = N |\Phi_2 \cos \varphi|^2.$$

Выражение для расчета сопротивления связи получаем по стандартной методике; оно имеет вид

$$\begin{aligned} R_{св\ n} = \frac{k \left| \frac{L_{om}}{L_{om}} \right|^2 \frac{\left| 1 - \frac{\sin 2\gamma_n d}{2\gamma_n d} \right|}{|\sin \gamma_n d|^2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{2\sigma d \beta_n^2 \sum_{s=-\infty}^{\infty} \left| \frac{L_{sm}}{L_{mo}} \right|^2 \frac{\beta_s |M|}{\gamma_s^2 \sin^2 \gamma_s d}} \left[\kappa^2 - \left(\frac{\pi}{2\sigma} \right)^2 \right]; \quad (3) \\ M = 1 + \frac{\sin 2\gamma_s d}{2\gamma_s d}. \end{aligned}$$

Параметры замедляющей системы рассчитываются на ЭВМ путем совместного решения уравнений (1) и (2). Ввиду однозначности задания постоянной распространения $\beta_n = \beta_0 + \frac{\pi S}{L}(2L - \text{период системы})$ достаточно определить в уравнении (1) одно из решений, которое после подстановки в (2) дает возможность определить собственные волновые числа системы. При расчетах учитываются четыре собственных типа волн в областях 1, 4, 5 и двенадцать пространственных гармоник в пространстве взаимодействия.

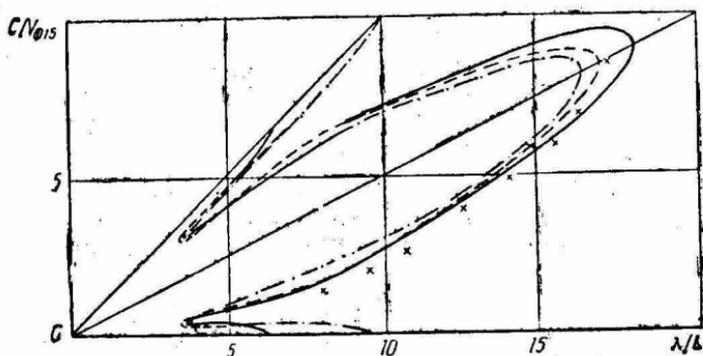


Рис. 2. Влияние ширины пространства взаимодействия на дисперсию системы: — $\sigma = 4,375L$; — — $\sigma = 5,625L$; - - - $\sigma = 6,875L$ ($\frac{q}{L} = 10$; $\frac{d}{L} = 1,25$; $\frac{a}{L} = 4,375$; $\frac{l}{L} = 0,25$).

Результаты расчета дисперсионных характеристик волноводной встречно-штыревой замедляющей системы приводятся на рис. 2. Отсечки в длинноволновой полосе пропускания определяются приближенно геометрическими параметрами замедляющей системы и равны

$$\lambda_{\varphi=0} \approx 4\sigma; \quad \lambda_{\varphi=\pi} \approx 4q.$$

Как показывают исследования, изменение высоты волноводной части мало влияет на ход дисперсионной кривой (эти графики здесь не приводятся).

Увеличение ширины пространства взаимодействия 2σ приводит к некоторому сужению полосы пропускания, но при этом коротковолновая отсечка λ_0 смещается в длинноволновую область. При некоторых значениях σ , сравнимых или больших q , можно добиться того, что отсечка 0-вида выйдет за пределы рабочей полосы частот.

Использование системы с широкой волноводной частью также желательно, так как в поперечном сечении пространства взаимодействия электромагнитное поле более однородно.

Сопротивление связи нулевой и минус второй пространственных гармоник, рассчитанное по соотношению (3), имеет величину

достаточную для использования таких замедляющих систем в ЛБВ М-типа. Сопротивление связи нечетных пространственных гармоник мало, поэтому нет необходимости останавливаться на их анализе.

Экспериментальное исследование данной системы проводится на макете, содержащем 10 периодов. Дисперсионные характеристики измеряются резонансным методом [5], экспериментальные точки отмечены крестиками на рис. 2 ($\sigma = 5,625L$).

Сопротивление связи на той же установке измеряется по методу, описанному в работе [6], и вычисляется по формуле

$$R_{\text{свп}} = 2\eta \left(\frac{C}{V_{\text{гр}}} \right) \left(\frac{v_{\text{ф.п}}}{c} \right) \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{\left(\int_0^L V_{\Delta\omega} \cos \beta_n z dz \right)^2 + \left(\int_0^L V_{\Delta\omega} \sin \beta_n z dz \right)^2}{\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} - 1 \right) \frac{d\omega}{dv} \Delta\tau} \quad (4)$$

Здесь $\eta = 120\pi$ — волновое сопротивление свободного пространства;

$\Delta\omega = \frac{d\omega}{dv} \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ — относительное изменение энергии;

ω_0 — частота в относительных единицах;

$\Delta\tau$ — объем возмущающего тела;

L — длина системы;

β_n — фазовая постоянная n -й пространственной гармоники;

λ — длина волны в свободном пространстве.

Выражение (4) справедливо для режима стоячих волн; чтобы перейти к режиму бегущих волн, необходимо результат вычислений разделить на два.

Теоретические и экспериментальные значения сопротивления связи нулевой и минус второй пространственных гармоник приводятся на рис. 3. Как из него видно, результаты экспериментального исследования волноводной встречно-штыревой замедляющей системы хорошо согласуются с результатами расчета, что подтверждает правильность мето-

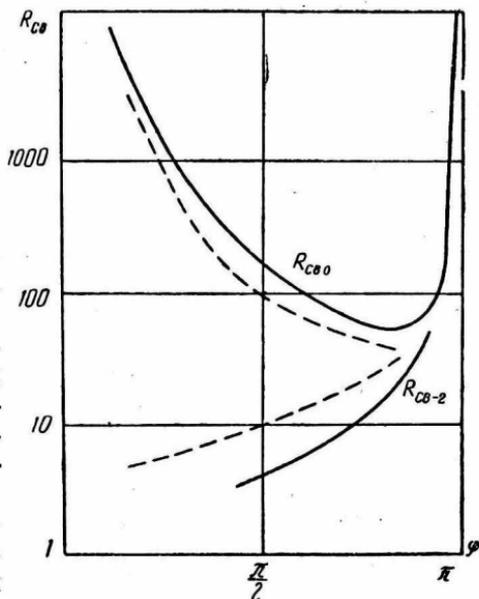


Рис. 3. Сопротивление связи в зависимости от фазового сдвига φ (— теоретическая кривая; - - - экспериментальная кривая).

дики расчета. Кроме этого, экспериментально исследовалось влияние различного рода неоднородностей, вводимых в систему.

Исследования показывают, что дисперсия системы мало зависит от толщины штырей гребенок и их взаимного расположения по оси Oz . Влияние неоднородностей проявляется в том, что сопротивление связи несимметричной системы увеличивается по отношению к симметричной системе вблизи отсечек, а в средней части полосы пропускания оно становится меньше, чем $R_{св}$ симметричной системы.

Рассматриваемую замедляющую систему можно рекомендовать к использованию в мощных ЛБВ M -типа, так как она обладает широкой полосой пропускания, достаточно высоким сопротивлением связи и хорошим теплоотводом.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. E. Pokorny, A. E. Kushnick, J. F. Hull. The dematron — a new crossed-field amplifier, IRE Trans, 1962, E. Д.—9, № 4, p. 337—345.
2. Microwaves Centrex Publishing Co, Eindhoven 1963, Proc. of the 4th International Congress on microwave tubes in sheveningen, 3—7, Sept, 1962, p. 43—46.
3. Tubes pour hyperfrequences Travaux du 5-e Congress International, Paris, 14—18, Sept. 1964.
4. А. Г. Шейн, В. В. Старостенко. Сб. «Радиотехника», вып. 18. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971, с 40—46.
5. Ю. П. Альтшулер, А. С. Татаренко. Лампы малой мощности с обратной волной. Изд-во «Советское радио», 1963. 250 с.
6. В. Г. Шульга, А. Г. Шейн. Сб. «Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, 1966, с. 54—68.