

ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ЛИНЕЙНОСТИ ФАЗО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛБВ, ВЫЗВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЕМ СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЯЗИ И ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

А. В. Рязанов

Для передачи сигнала без искажений необходимо, чтобы фазо-частотная характеристика ЛБВ была линейной в пределах полосы частот усиливаемого сигнала. Так, при усилении ЧМ сигналов в передающем и приемном трактах РЛС со «сжатием» импульса допустимые искажения фазо-частотной характеристики тракта определяются допустимыми искажениями параметров «сжатого» импульса (уменьшением амплитуды основного лепестка и уровнем боковых лепестков). Например, для того, чтобы амплитуда боковых лепестков не превышала 0,01 амплитуды основного лепестка, допустимые пульсации фазы сигнала на выходе тракта усиления не должны превышать 1° (1).

В работе, на основании линейной теории, приводится приближенная оценка искажений фазо-частотной характеристики ЛБВ, вызванных изменением сопротивления связи и параметров пучка при значительных изменениях частоты входного сигнала (порядка 10% от средней частоты), при условии согласования замедляющей системы с в. ч. нагрузкой и поглощающей вставкой и при отсутствии дисперсии замедляющей системы в полосе частот усиливаемого сигнала.

Как известно, разность фаз между входным и выходным сигналами в ЛБВ

$$\Delta\varphi = \beta L, \quad (1)$$

где

$$\beta = \frac{\omega}{v_\phi};$$

L — длина замедляющей системы.

Учитывая, что

$$\beta = \beta_e (1 - Cy),$$

где

$$\beta_e = \frac{\omega}{v_e}, \quad C = \left(\frac{KJ_0}{4\mu_0}\right)^{1/2},$$

выражение (1) может быть записано как

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2, \quad (2)$$

где

$$\Delta\varphi_1 = \frac{L}{v_e} \omega, \quad \Delta\varphi_2 = Cy \frac{L}{v_e} \omega.$$

Как видно, $\Delta\varphi_1$ линейно зависит от ω . Выясним характер зависимости $\Delta\varphi_2$ от ω .

Сопротивление связи K , входящее в выражение для параметра усиления C , как известно, изменяется при изменении частоты входного сигнала, т. е.

$$K = K(\omega).$$

Параметр y , характеризующий отличие фазовой скорости волны в системе с пучком v_ϕ от скорости электронов v_e , как видно из графического решения основного уравнения ЛБВ при отсутствии затухания в замедляющей системе ($d = 0$) (2), может быть выражен для области усиления линейной функцией пространственного заряда QC и параметра несинхронности b [3] в виде

$$y = \begin{cases} -0,5 - 0,72QC - 0,41b & \text{для } QC = 0,25 \\ -0,5 - 0,6QC - (0,42 + 0,07QC)b & \text{для } QC = 0,5 \\ -0,5 - 0,5QC - (0,42 + 0,09QC)b & \text{для } QC = 1 \end{cases}. \quad (3)$$

Принимая для $QC = 0,25$

$$y = -0,5 - 0,72QC - 0,41b, \quad (4)$$

где

$$QC = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{C} \cdot \frac{\omega_q}{\omega} \right)^2;$$

$$\omega_q = S\omega_p;$$

S — коэффициент редукции плазменной частоты, зависящей от частоты входного сигнала;

$$b = \frac{v_e - v_{\phi 0}}{v_{\phi 0} C}.$$

Тогда

$$\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_2' + \Delta\varphi_2'' + \Delta\varphi_2'''; \quad (5)$$

здесь

$$\Delta\varphi_2' = AK(\omega)^{1/2}\omega;$$

$$\Delta\varphi_2'' = B \frac{S(\omega)^2}{K(\omega)^{1/2}\omega};$$

$$\Delta\varphi_2''' = B\omega;$$

$$A = \frac{0,5L}{v_e} \left(\frac{J_0}{4u_0} \right)^{1/2};$$

$$B = \frac{0,72L}{4v_e} \frac{\omega_p^2}{\left(\frac{J_0}{4u_0} \right)^{1/2}};$$

$$B = \frac{0,41L}{v_e} \frac{v_e - v_{\phi 0}}{v_{\phi 0}}.$$

Таким образом, для определения $\Delta\varphi_2$ необходимо иметь зависимости $K(\omega)$ и $S(\omega)$, так как коэффициенты A , B и B от частоты входного сигнала практически не зависят при условии постоянства дисперсии замедляющей системы ($v_{\phi 0} = \text{const}$), что практически выполняется в диапазоне усиления.

Анализ выражения (5) в общем виде крайне затруднителен ввиду сложных зависимостей K и S от ω , входящих в $\Delta\varphi_2'$ и $\Delta\varphi_2''$.

Количественная оценка влияния частотной зависимости $K(\omega)$ и $S(\omega)$ может быть произведена на примере конкретной ЛБВ, в частности ЛБВ типа УВ-7, имеющей следующие параметры:

диапазон частот $3400 \div 4400$ МГц;
 ускоряющее напряжение $u_0 = 1500$ в;
 ток пучка $I_0 = 30$ ма;
 длина замедляющей системы $L = 0,2$ м;
 радиус спирали $a = 1,75$ мм;
 радиус пучка $b_1 = 0,87$ мм (т. е. $\frac{b_1}{a} = 0,5$);
 выходная мощность $P_{\text{вых}} = 2 \div 3$ вт.

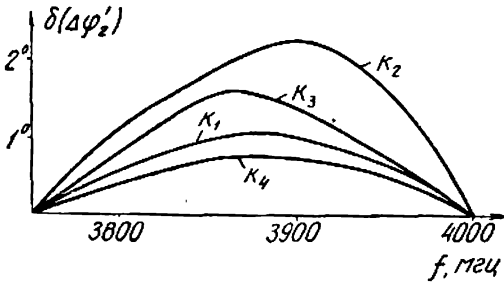


Рис. 1.

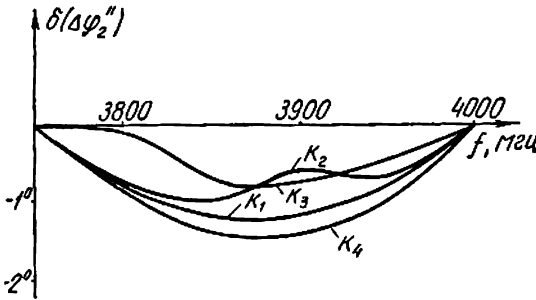


Рис. 2.

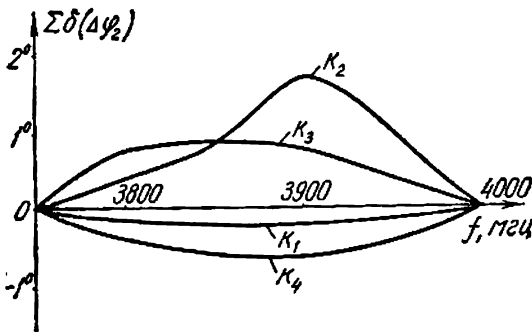


Рис. 3.

$K_1 = 38 \div 48$ ом — определенное по (7) с учетом наличия диэлектрических опор [4];

Для указанных параметров ЛБВ значения коэффициентов

$$A = 0,74 \cdot 10^{-10} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{сек};$$

$$B = 1,16 \cdot 10^{12}$$

$$\text{рад}^2 \cdot \text{сек}^{-1} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{3}},$$

$$QC \approx 0,25.$$

При изменении частоты входного сигнала в диапазоне $3750 \div 4000$ МГц, что соответствует изменению $\beta_e a$ в пределах $1,75 \div 1,86$ и $\gamma_0 a$ в пределах $1,77 \div 1,89$, коэффициент редукции $S = S(\beta_e a)$ [4] и сопротивление связи $K = K(\gamma_0 \cdot a)$ [2] аппроксимируются линейным приближением

$$S(\omega) = 0,05 + 0,19 \cdot 10^{-10} \cdot \omega; \quad (6)$$

$$K(\omega) = 396 - 1,27 \cdot 10^{-8} \cdot \omega. \quad (7)$$

На рис. 1, 2 и 3 показаны отклонения от линейности фазо-частотной характеристики, вычисленные отдельно для составляющих $\Delta\varphi_2'$ (рис. 1) и $\Delta\varphi_2''$ (рис. 2), а также результирующие (рис. 3) для различных значений сопротивлений связи:

$K_2 = 95 \div 125 \text{ ом}$ — экспериментальное значение для подобной ЛБВ [4];

$K_3 = 50 \div 60 \text{ ом}$ } — возможные значения сопротивления;

$K_4 = 20 \div 25 \text{ ом}$ } связи для типовых ЛБВ.

Как видно из рис. 3, отклонения от линейности фазо-частотной характеристики в заданном диапазоне изменения частоты для данного примера могут составлять $1^\circ \div 1,7^\circ$, что по величине и характеру изменения близко к известным экспериментальным результатам [5].

ВЫВОДЫ

1. Показано, что даже при отсутствии дисперсии замедляющей системы и отражений от в. ч. нагрузки, фазо-частотная характеристика ЛБВ не линейна, что следует учитывать при усилении сигналов с большой девиацией частоты.

2. Отклонения от линейности фазо-частотной характеристики ЛБВ вызываются, помимо наличия отражений от нагрузки и дисперсии замедляющей системы, изменением сопротивления связи и параметров электронного потока (эффективной плазменной частоты).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Ди Франко, Рубин. Анализ искажений при обработке радиолокационного сигнала. «Зарубежная радиоэлектроника», 1963, № 9.

2. Д. Р. Пирс. Лампа с бегущей волной, пер. с англ. под ред. В. Т. Овчарова, изд-во «Сов. радио», 1952.

3. W. R. Veam, D. F. Blattner. Phase angle distortion in travelling-wave tubes. RCA Rev., 1956, 17, p. 86—96.

4. В. Клеен, К. Пешль. Введение в электронику сверхвысоких частот. Ч. II, пер. с нем. под ред. В. А. Солнцева, изд-во «Сов. радио», М., 1963.

5. L. Clappitt, M. Huse, W. Smith. Measurement of phase characteristics of high power microwave tubes. «IEEE International Convention Record», 1963, part 3, p. 147—153.