

## СООТНОШЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛЯ В ДВУХЛУЧЕВОЙ ЛБВ

**В. Г. Шульга, М. Ф. Ступко, Б. Н. Бондаренко,  
С. И. Ковалевский**

Донецк

В широкополосных ЛБВ довольно высокая интенсивность второй гармоники оказывает существенное влияние на выходную мощность основной частоты [1—3]. Такую интенсивность на выходе можно уменьшить путем подачи на вход ЛБВ сигнала на удвоенной частоте определенной величины и фазы или путем введения участка замедляющей системы с уменьшением шага [1, 2].

В данной работе теоретически исследуется соотношение амплитуд гармонических составляющих поля в двухлучевой ЛБВ в нелинейном режиме.

Система уравнений, которая использовалась для численного решения, получена как частный случай системы уравнений, выведенных в [4], и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dF_1}{d\theta} + b_1 C_1 F_1 &= -(1 + C_1 b_1)^2 [I_{11}(1 + C_1 h) + I_{21}(1 - C_1 h)]; \\ \frac{dF_2}{d\theta} + 2i \frac{C_2}{C_1} b_2 F_2 &= -4 \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^3 (1 + b_2 C_2)^2 [I_{12}(1 + C_1 h) + I_{22}(1 - C_1 h)]; \\ \frac{\partial^2 \Phi_{1,2}}{\partial \theta^2} &= - \left( \frac{1}{1 \pm C_1 h} + C_1 \frac{\partial \Phi_{1,2}}{\partial \theta} \right)^3 \times \\ &\times \operatorname{Re} \left\{ \left[ F_1 e^{i(\Phi_{1,2} \mp \frac{\theta h}{1 \pm C_1 h})} + F_2 e^{2i(\Phi_{1,2} \mp \frac{\theta h}{1 \pm C_1 h})} + \right. \right. \\ &\left. \left. + iq \sum_k \left( \frac{1 + C_1 h}{k} P_{1k}^2 I_{1k} + \frac{1 - C_1 h}{k} P_{2k}^2 I_{2k} \right) \right] e^{ik(\Phi_{1,2} \mp \frac{\theta h}{1 \pm C_1 h})} \right\}; \\ I_{1,2k} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-ik(\Phi_{1,2} \mp \frac{\theta h}{1 \pm C_1 h})}, \end{aligned}$$

- где  $K$  — номер гармоники;  
 $q$  — параметр пространственного заряда;  
 $b_{1,2}$  — параметр рассинхронизма на частотах  $\omega$  и  $2\omega$ ;  
 $C_1, C_2$  — параметры усиления на основной и удвоенной частотах;  
 $h$  — параметр разности скоростей;  
 $F_1, F_2, I_{1,2}$  — медленно изменяющиеся амплитуды поля и тока на основной и удвоенной частотах ( $l = 1, 2$ ),  
 $P_{1,2k}$  — гармоника коэффициента депрессии;  
 $\theta$  — безразмерная длина.

Приведенная система уравнений решалась на ЭЦВМ методом Рунге-Кутты при следующих граничных условиях:  
 при  $\theta = 0$   $\text{Re } F_1 = F_{01}$ ;  $\text{Im } F_1 = 0$ ;  $\text{Re } F_2 = \text{Im } F_2 = 0$ ;

$$\Phi_{01, n} = \frac{2\pi n}{N}; \quad \frac{\partial \Phi_{1n}}{\partial \theta} = 0;$$

$$\Phi_{02, m} = \frac{2\pi m}{N}; \quad \frac{\partial \Phi_{2m}}{\partial \theta} = 0;$$

$$m, n = 0, 1, 2 \dots, N-1.$$

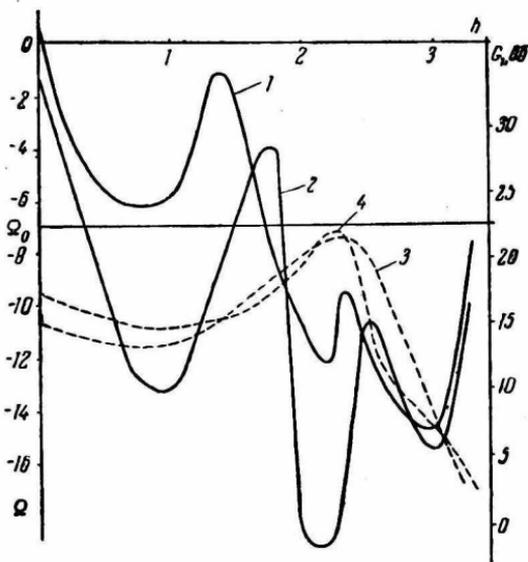


Рис. 1. Зависимость коэффициента подавления второй гармоники поля  $\Omega$  (сплошная линия) и коэффициента усиления первой гармоники  $C$  (пунктир) от параметра  $h$ :

(кривые 1, 3 для  $C_1 = 0,1$ ;  $F_{01} = 0,2$ ;  $b_1 = -1$ ;  $q = 1$ ; кривые 2, 4 для  $C_1 = 0,1$ ;  $F_{01} = 0,2$ ;  $b_1 = -1$ ;  $q = 2$ ).

Сопrotивление связи и фазовая скорость на удвоенной частоте определялись из соотношений:

$$v_{\phi 1}/v_{\phi 2} = 1,1; \quad \delta_2 = K_2/K_1 = 0,177.$$

На рис. 1 приведена зависимость отношения мощности второй гармоники к первой  $\Omega$  в точке насыщения последней (сплошные линии) от параметра рассинхронизма для режима  $C_1 = 0,1$ ,  $b_1 = -1$ ,  $F_{01} = 0,2$ ,  $q = 1$  (кривая 1) и  $q = 2$  (кривая 2). Горизонтальная линия определяет значение  $\Omega \equiv \Omega_0$  для однолучевой ЛБВ. Из кривых видно, что, меняя разность скоростей электронных потоков, можно существенно изменить относительный уровень второй гармоники. Причем существуют области значений  $h$ , где  $|\Omega| < |\Omega_0|$  и области, в которых  $|\Omega| > |\Omega_0|$ . Последние режимы, очевидно,

могут быть использованы для подавления второй гармоники поля на выходном конце двухлучевой ЛБВ. Так, при  $h = 2,2$ ,  $\Omega = -19,2$  дБ, что на 12 дБ выше значения  $\Omega_0$ .

Ход зависимости, приведенной на рис. 1, можно объяснить, если проследить за относительным расположением на шкале скоростей  $v_1 = v_0(1 + C_1 h)$ ,  $v_2 = v_0(1 - C_1 h)$  и фазовых скоростей на частотах  $\omega$  и  $2\omega$  соответственно.

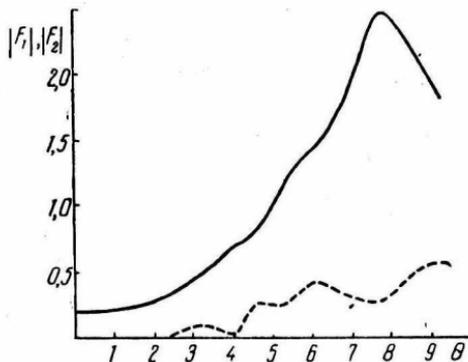


Рис. 2. Безразмерная амплитуда ВЧ поля на основной (сплошная линия) и удвоенной (пунктир) частотах в зависимости от  $\theta$  ( $C_1 = 0,1$ ;  $F_{01} = 0,2$ ;  $b_1 = -1$ ;  $q = 2$ ;  $h = 2,2$ ).

При  $h = 0$  и  $b_1 = -1$   $v_{\phi 1} > v_0 > v_{\phi 2}$ . Таким образом обеспечивается достаточное усиление волны на удвоенной частоте и значительно меньшее усиление на основной частоте.

При значении  $h = 2,2$   $v_1 > v_{\phi 1}$ ;  $v_1 \gg v_{\phi 2}$ ;  $v_2 < v_{\phi 2}$  и, таким образом, быстрый электронный поток находится в условиях синхронизма, обеспечивающих максимум усиления на основной частоте. Это хорошо видно из рис. 1, где приведена зависимость коэффициента усиления первой гармоники от  $h$  (пунктир). Для  $b_1 = -1$   $q = 1$ ,  $C_1 = 0,1$   $F_{01} = 0,2$  (кривая 3) и  $b_1 = -1$   $q = 2$ ,  $C_1 = 0,1$ ,  $F_{01} = 0,2$  (кривая 4).

Связь быстрого потока со второй гармоникой слаба ввиду значительного рассинхронизма. Скорость медленного потока меньше скорости распространения волны на частоте  $2\omega$ , что дает основание говорить о преимущественном подавлении второй гармоники. Это хорошо видно из рис. 2, где приведены зависимости безразмерных амплитуд полей на частоте  $\omega$  (сплошная линия) и  $2\omega$  (пунктирная линия) от безразмерной длины  $\theta$ . Если при  $h = 0$  амплитуды поля на основной и удвоенной частотах нарастают монотонно, то при

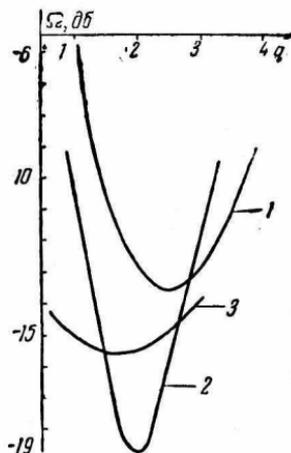


Рис. 3. Зависимость коэффициента подавления второй гармоники от параметра пространственного заряда при  $C_1 = 0,1$ ;  $F_{01} = 0,2$ ;  $b_1 = -1$  и  $h = 1$  (кривая 1),  $h = 2$  (кривая 2),  $h = 3$  (кривая 3)

$h = 2,2$  изменение амплитуды поля на удвоенной частоте носит пульсирующий характер, тогда как на основной частоте амплитуда поля непрерывно растет (до насыщения). Следует отметить, что при  $h = 0,5; 1; 1,5$  наблюдаются пульсации поля и на основной частоте, что говорит об увеличении взаимного влияния первой и второй гармоник.

Было бы неправильно объяснять полученные зависимости лишь с точки зрения синхронизма. Несомненно, что существует несколько факторов, влияющих на соотношение гармонических составляющих поля в двухлучевой ЛБВ. В качестве одного из них можно назвать электронно-волновое взаимодействие. На рис. 3 приведена зависимость коэффициента подавления от  $q$  при  $h = 1, 2, 3$ . Для  $h = 2,2, q = 2$  (режим, обеспечивающий максимум подавления второй гармоники) параметр ( $x = 1,5$ ) неоднородности электронных потоков принимает значение, соответствующее максимальному электронно-волновому взаимодействию в нелинейном режиме.

Таким образом, теоретически показано, что разность скоростей электронных потоков существенно влияет на соотношение гармонических составляющих усиливаемого сигнала и при этом существуют режимы, обеспечивающие значительное подавление второй гармоники на выходе двухлучевой ЛБВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Е. М. Ильина, А. М. Кац, Д. Д. Милютин, Я. Е. Нудельман, В. А. Штерн. Частный случай двухчастотного режима работы ЛБВ. «Электронная техника», МЭП СССР, серия 1, «Электроника СВЧ», 1971, вып. 12, с. 34—42.

2. А. Д. Жуков, Е. М. Ильина, А. М. Кац. Подавление второй гармоники в ЛБВ. «Электронная техника», МЭП СССР, серия 1, «Электроника СВЧ», 1971, вып. 12, с. 51—55.

3. М. Б. Цейтлин, Ю. В. Губин. Анализ работы ЛБВ с полым пучком в нелинейном режиме. «Вопросы радиоэлектроники», серия 1, «Электроника», 1965, вып. 5, с. 12—18.

4. В. Г. Шульга, М. Ф. Степко, Б. Н. Бондаренко. Нелинейные уравнения двухлучевой ЛБВ в случае усиления сложных сигналов. Сб. «Радиотехника», вып. 20. Изд-во ХГУ, Харьков, 1972, с. 123—127.