

# Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 621.385.632

Е.Д. Белявский, д-р физ.-мат. наук, Т.А. Саурова, О.В. Теличкина

## Теория многолучевой автофазной лампы бегущей волны

Построена нелинейная одномерная теория многолучевой автофазной лампы бегущей волны с переменной фазовой скоростью. Проведено численное исследование её характеристик для группирователя с одним участком пониженного сопротивления связи в широкой области безразмерных параметров прибора.

A nonlinear one-dimensional theory of the multibeam autophase traveling wave tube with variable phase velocity was evolved. An investigation of its characteristics for the buncher with one section of low interaction impedance in a wide range of intangible parameters in this device was carried out.

### Введение

Применение в лампе бегущей волны (ЛБВ) электронного потока, состоящего из нескольких пучков, каждый из которых движется в отдельном пролётом канале, позволяет существенно снизить рабочие напряжения и увеличить первеанс потока [1]. Коэффициент полезного действия (КПД) такой ЛБВ можно повысить при помощи режима захвата электронных сгустков (автофазный режим) в лучах полем электромагнитной волны в замедляющей системе (ЗС) многолучевой ЛБВ. В [2] предложены способы выполнения и конструкция автофазной многолучевой ЛБВ (АМ ЛБВ), позволяющие получить высокий КПД. В [3] создана приближённая адиабатическая нелинейная теория многолучевой автофазной ЛБВ с переменной фазовой скоростью, на основе которой получены условия устойчивости сгустков электронных осцилляторов и методика приближённого инженерного расчёта АМ ЛБВ.

Данная работа посвящена созданию строгой нелинейной теории многолучевой автофазной ЛБВ с переменной фазовой скоростью и с одним участком пониженного сопротивления связи в ЗС и расчётам подобной ЛБВ на электронной вычислительной машине (ЭВМ).

### Исходные положения

Одномерные нелинейные уравнения АМ ЛБВ с переменной фазовой скоростью и одним участком с уменьшенным сопротивлением свя-

зи для идентичных лучей имеют следующий вид:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = W,$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -(1 + CW)^3 \left\{ \operatorname{Re} \sum_k j \frac{q_k}{k} I_k \exp(jkZ) + a \operatorname{Re} F \exp(jZ) \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{dF}{dx} + j(b - jd)F = -I_1,$$

$$I_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-jkZ) d\phi_0.$$

Здесь  $Z = \omega t - \beta_e z$ ;  $x = C\beta_e z$  – безразмерная длина;  $W = \omega / v_z - \beta_e$ ;  $\beta_e = \omega / v_e$ ;

$z$  – продольная длина;  $v_e = \sqrt{2\eta U_0}$  – продольная скорость невозмущённого потока;

$U_0$  – ускоряющее напряжение;  $v_z$  – продольная скорость;  $\eta = e / m_0$  – отношение заряда электрона к его массе покоя;

$$C^3 = \frac{I_0 R_{ce}}{4U_0 \beta_e^2},$$

$C$  – параметр усиления;  $I_0 = \sum_{n=1}^N I_{0n}$  – суммарный

ток невозмущённого многолучевого потока;  $I_{0n}$  – ток невозмущённого тока  $n$ -того луча;  $R_{ce}$  – сопротивление связи синхронной волны в ЗС;  $F$  – безразмерная амплитуда синхронной волны в ЗС;

$b = \frac{\beta - \beta_e}{C\beta_e}$  – параметр несинхронности;

$\beta = \omega / v_0$ ;

$v_0$  – фазовая скорость волны;  $d$  – параметр затухания;

$$q_k = \frac{\rho_k^2}{\epsilon_0} \cdot \frac{I_0}{S_k} \cdot \frac{\eta}{\omega^2 C^2},$$

$\rho_k^2, S_k$  – коэффициент депрессии и площадь эффективного поперечного сечения одного из лучей на частоте  $k\omega$ ;  $q_1 = 4QC$  – параметр объ-

ёмного заряда;  $I_k$  – безразмерная амплитуда  $k$ -той гармоники тока в одном из лучей в подвижной системе координат;  $\phi_0 = \omega t_0$ ,  $t_0$  – начальное время. Считаем все  $I_{0n}$  идентичными, т.е.  $I_0 = N I_{0n}$ , где  $N$  – число лучей в многолучевом потоке.  $a$  – постоянная ( $a < 1$  на участке с пониженным  $R_{ce}$  и равно 1 на остальном участке АМ ЛБВ).

Закон профилирования фазовой скорости на автофазном участке имеет следующий вид:

$$\frac{db}{dx} = \alpha_1 (1 + Cb)^3 F, \quad (2)$$

где  $F = |F|$ ,  $0 \leq \alpha_1 \leq 1$ ,  $b = b_0$  на входе в автофазный участок ( $x = x_2$ )

### Анализ результатов расчёта

На основе уравнений (1)–(2) была создана программа для нелинейного расчёта многолучевой АЛБВ с переменной фазовой скоростью. Ниже приведены результаты расчёта данной АМ ЛБВ.

В табл. 1 приведена зависимость минимального значения параметра несинхронности  $b_{\min}$  (при постоянном начальном значении  $b = b_0$  на входе автофазного участка АМ ЛБВ) от параметра жёсткости регулирования фазовой скорости  $\alpha_1$ .

Из этой таблицы следует, что глубина торможения фазовой скорости, состоящая в уменьшении минимального параметра несинхронности, увеличивается, по мере увеличения жёсткости  $\alpha_1$  от 0,05 до 0,3.

В таблице 2 представлена зависимость коэффициента полезного действия от параметра объёмного заряда  $4QC$ .

Из этой таблицы следует, что КПД ( $\eta_e$ ) неравномерно изменяется при изменении  $4QC$  от 0,01 до 0,5, причём достигает максимального значения при  $4QC = 0,2$  0,57 (57%), а его неравномерность в рассматриваемом интервале  $4QC$  составляет 0,539 (53,9%) и 0,521 (52,1%) на границах рассматриваемого диапазона изменения  $4QC$ .

На рис.1 представлена зависимость фазовых траекторий электронов, влетевших на

входе ( $x = 0$ ) за один период начальной фазы  $\phi_0 (Z(\phi_0, x))$ .

Из рис.1 следует, что в группирователе электроны группируются в сгустки, захватываются на автофазном участке, разделяются на два шлейфа, один из которых формируется из электронов собственного периода, а второй из электронов перешедших в соседний период бегущей волны ВЧ-поля в ЗС. Разность фаз между центрами двух шлейфов составляет  $2\pi$ , т.е. сгустки образуются из электронов, входящих в шлейф из собственного периода и другого шлейфа, образованного из электронов, влетевших на входе в соседний период поля (от  $-2\pi$  до 0), не нанесенных на графике. Видно, что четыре из 32 электронов не захватываются в сгустки, что является следствием принятой конструкции группирователя; одного участка с пониженным сопротивлением связи не достаточно для обеспечения 100% захвата всех электронов в сгустки.

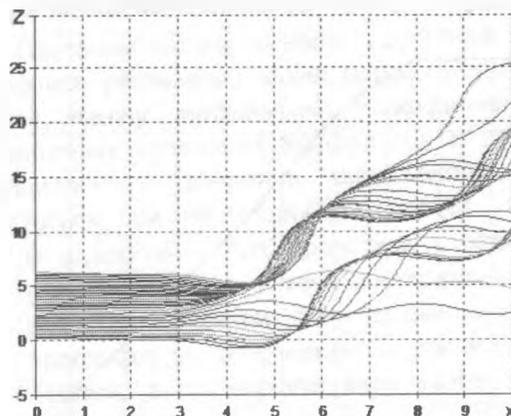


Рис. 1. Фазовые траектории 32 «электронов» вдоль нормированной длины прибора  $x$  ( $b_0 = -0,05$ ,  $4QC = 0,05$ ,  $\alpha_1 = 0,3$ )

На рис.2 построена зависимость электронного КПД  $\eta_e$  от безразмерной длины  $x$ .

Из рис. 2 видно, что КПД имеет максимум 0,57 (57%) при значении нормированной длины  $x = 5,6$ , который примерно на 20% выше КПД обычной многолучевой ЛБВ [1], однако, значительно меньше предельного значения  $\eta_e \rightarrow 100\%$  АМ ЛБВ, которое, в принципе, может быть получено при оптимальном группирователе со 100% захватом электронов в сгустки [4].

Таблица 1. Зависимость параметра несинхронности от параметра жесткости регулирования фазовой скорости

$\alpha_1$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
$b_{\min}$	- 0.779	- 1.056	- 1.334	- 1.615	- 1.888	- 2.166

Таблица 2. Зависимость КПД от параметра объёмного заряда

$4QC$	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\eta_e$	0.539	0.544	0.556	0.570	0.566	0.549	0.521

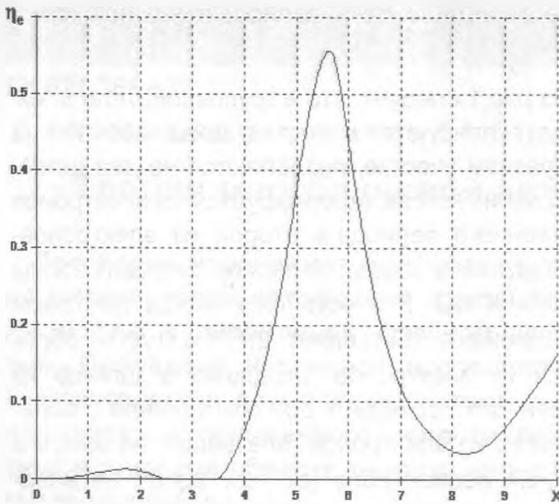


Рис. 2. Зависимость электронного КПД ( $\eta_e$ ) от нормированной длины прибора  $x$  ( $b_0 = -0.05$ ,  $4QC = 0.2$ ,  $\alpha_1 = 0.2$ )

На рис.3 представлена зависимость параметра несинхронности от нормированной длины  $x$ .

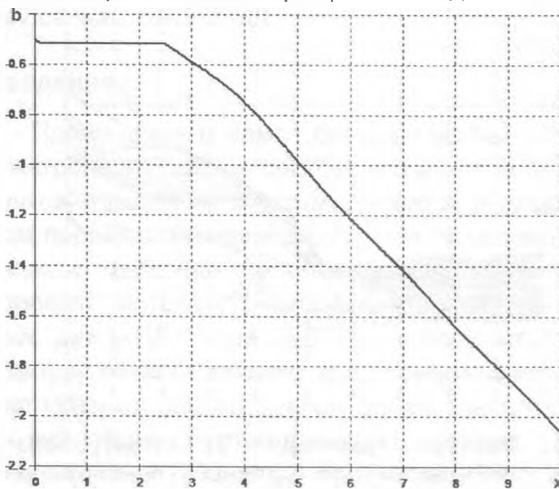


Рис. 3. Зависимость безразмерного параметра фазовой скорости от нормированной длины прибора  $x$  ( $b_0 = -0.05$ ,  $4QC = 0.05$ ,  $\alpha_1 = 0.3$ ,  $F_0 = 2$ )

Как видно из рисунка, параметр несинхронности монотонно уменьшается после группирователя на автофазном участке АМ ЛБВ, что со-

ответствует монотонному торможению фазовой скорости бегущей волны в ЗС.

## Выводы

Построена одномерная нелинейная теория многолучевой автофазной ЛБВ с одним участком пониженного значения сопротивления связи и переменной фазовой скоростью, сформулированы интегро-дифференциальные уравнения такой АМ ЛБВ. Разработана программа расчёта на основе метода «крупных частиц» и проведен численный анализ таких приборов для широкого спектра их безразмерных параметров. Получен электронный КПД многолучевой АЛБВ 52-57% в широкой области изменения указанных параметров, который на 20% выше КПД обычных многолучевых ЛБВ и отмечено, что этот КПД может быть повышен до значений, близких к предельно возможному при использовании группирователя со многими участками с пониженным сопротивлением связи, обеспечивающий 100% захват всех электронов в сгустки во всех лучах АМ ЛБВ.

## Литература

1. *Белявский Е.Д., Васютин В.Д., Кравченко Г.Г.* Влияние провисания ВЧ поля на его взаимодействие с электронным пучком в многолучевой ЛБВ // *Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ.*- 1974.-вып.10.-с.35-40.
2. *Белявский Е.Д., Саурова Т.А.* Многолучевая автофазная лампа бегущей волны // *Электроника и связь.*-2007.-№ 26.-с.13
3. *Саурова Т.А.* Адиабатическая нелинейная теория многолучевой автофазной лампы бегущей волны с переменной фазовой скоростью // *Электроника и связь.*-2008.-№ 1-2.-с.114-115.
4. *Белявский Е.Д., Саурова Т.А.* Оптимизация преобразования энергии в многолучевой автофазной лампе бегущей волны // *Техника и приборы СВЧ.*-2010.-№1.-с.3-7.