



## ЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ МНОГОСЕКЦИОННЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЛБВ С НЕОДНОРОДНОЙ СПИРАЛЬНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ\*

*Т. А. Каретникова*

Целью работы является разработка математической модели и компьютерной программы для моделирования линейных режимов работы широкополосной лампы бегущей волны спирального типа, с учетом неоднородности замедляющей системы прибора вдоль пространства взаимодействия. Рассмотрена одномерная модель взаимодействия прямой и отраженной электромагнитных волн с электронным пучком в неоднородной секции замедляющей системы. Предложена методика расчета коэффициента линейного усиления и условий самовозбуждения многосекционных ламп бегущей волны. Изучены зависимости коэффициентов усиления от частоты и напряжения пучка в отсутствие и с учетом отражений. Проведено сравнение полученных результатов с результатами расчетов по одномерным программам CHRISTINE1D и TWT1D.

*Ключевые слова:* Лампа бегущей волны, спиральная замедляющая система, коэффициент усиления, паразитная генерация.

### Введение

В физике большое внимание уделяется приборам, работающим в диапазоне сверхвысоких частот. В центре проведенных исследований находится изучение процессов взаимодействия потоков заряженных частиц с переменными электромагнитными полями. Интерес представляют преимущественно такие системы, в которых время пролета электронов через пространство взаимодействия является сравнимым с длительностью периода возбуждаемых электронным потоком колебаний или даже намного превосходит его.

В любом электронном приборе взаимодействие переменного электромагнитного поля с электронами является основным в его работе. Поле воздействует на электронный поток, создает в нем переменный ток, который, в свою очередь, изменяет поле [1]. В физике такие системы называют самосогласованными.

\*Статья написана по материалам доклада на XV Зимней школе по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, Россия, 6–11 февраля 2012.

Современный широкополосный усилитель на лампе бегущей волны (ЛБВ) представляет собой сложный многосекционный прибор, причем каждая секция пространства взаимодействия может отличаться от остальных электродинамическими параметрами – сопротивлением связи, законом дисперсии, затуханием. Кроме того, существенное влияние на работу прибора могут оказать отражения усиленного сигнала как на входном и выходном концах пространства взаимодействия, так и в местах перехода от одной секции к другой внутри лампы. В связи с этим, важно уметь учитывать эти факторы в программах моделирования процессов в широкополосных ЛБВ. Одной из первых задач по исследованию режимов работы ЛБВ является создание программы, описывающей работу лампы в линейном режиме и режиме самовозбуждения. В настоящей работе изложен алгоритм и приведены результаты тестовых расчетов программы, позволяющей рассчитывать коэффициент линейного усиления и самовозбуждение паразитных колебаний в ЛБВ с учетом отражений и неоднородности параметров замедляющей системы прибора вдоль пространства взаимодействия.

### 1. Лампа бегущей волны: устройство и принцип действия

На рис. 1 схематично представлено устройство ЛБВ. Электронная пушка формирует пучок электронов с определенным сечением и интенсивностью. Ускоряющее напряжение  $U_0$  определяет скорость электронов. При прохождении замедляющей системы электронный пучок фокусируется сильным продольным магнитным полем.

Поступающий на вход СВЧ-сигнал усиливается в приборе и передается на выходной волновод, обработанный электронным пучком. Из-за отражения электромагнитной волны на концах замедляющей системы или на внутренних неоднородностях возможно возникновение внутренней обратной связи и как следствие паразитной генерации в системе, при этом ЛБВ может перестать выполнять свои функции усилителя. Для устранения этого эффекта вводится локальный поглотитель (обычно расположен на расстоянии  $1/3$  длины пространства взаимодействия от входного волновода), выполненный в виде стержня из поглощающей керамики или в виде поглощающих плёнок.

У реальных ламп замедляющая система состоит из нескольких секций, в пределах каждой из которых электродинамические параметры имеют постоянные значения, но отличающиеся от таковых от секции к секции. Исходя из этого, лампу бегущей волны, работающую в линейном режиме, можно представить в виде чередования сосредоточенных неоднородностей замедляющей системы, на которых про-

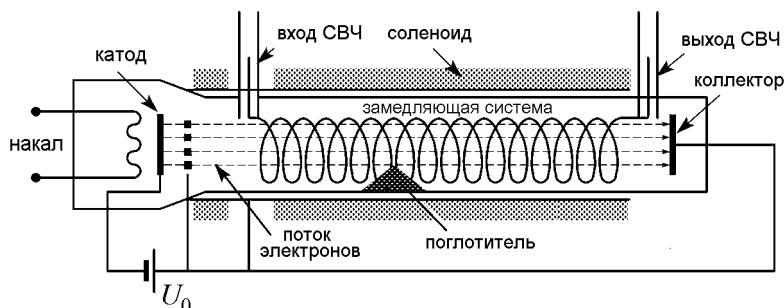


Рис. 1. Схема лампы бегущей волны

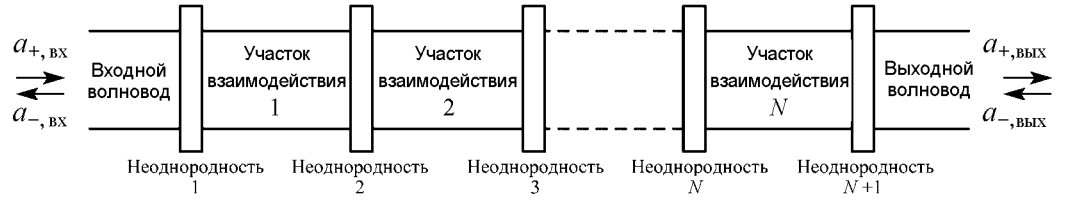


Рис. 2. Блок-схема ЛБВ в виде последовательно соединенных многополюсников

исходит рассеяние и взаимное преобразование прямой и встречной волн усиленного сигнала, а также участков взаимодействия, на которых изменение амплитуд волн происходит за счет их взаимодействия с электронным потоком. С двух сторон система подключена к входному и выходному волноводам. Схематическое изображение такой системы показано на рис. 2.

При таком подходе процессы, происходящие с сигналом и пучком при продвижении вдоль пространства взаимодействия можно выразить через матрицы передачи  $\hat{M}$  соответствующих участков лампы:

$$A_2 = \hat{M}A_1. \quad (1)$$

Здесь  $A = [a_+, a_-, J, dJ/d\xi]^T$ ;  $a_{\pm} = \sqrt{P_{\pm}} \exp(j\psi_{\pm})$  – амплитуды падающей и встречной волн, выраженные через их мощности  $P_{\pm}$  и фазы  $\psi_{\pm}$ ;  $J$  и  $dJ/d\xi$  – сгруппированный ток и его производная. Индексы 1 и 2 относятся к значениям указанных величин в сечениях, находящихся, соответственно, слева и справа от рассматриваемой неоднородности. Для получения результата для всей лампы необходимо перемножить матрицы передачи для участков взаимодействия и участков неоднородности

$$A_{N+1} = \hat{T}_{N+1} \hat{M}_N \hat{T}_N \hat{M}_{N-1} \cdots \hat{T}_2 \hat{M}_1 \hat{T}_1 A_1, \quad (2)$$

где  $\hat{T}_i$  – матрица передачи для  $i$ -го участка локальной неоднородности, а  $\hat{M}_i$  – матрица передачи для  $i$ -го участка пространства взаимодействия.

Элементы матрицы передачи для участка локальной неоднородности  $\hat{T}$  определяются из матрицы рассеяния  $\hat{S}$  на ней следующим образом:

$$\hat{T} = \begin{bmatrix} S_{21} - \frac{S_{11}S_{22}}{S_{12}} & \frac{S_{22}}{S_{12}} & 0 & 0 \\ -\frac{S_{11}}{S_{12}} & \frac{1}{S_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матрица рассеяния  $\hat{S}$  является унитарной и симметричной, поэтому для её полного задания необходимы три параметра: коэффициент отражения  $\Gamma$  и фазы коэффициентов отражения и пропускания. Данная матрица имеет вид [2]

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} \Gamma e^{j\varphi_1} & \sqrt{1 - |\Gamma|^2} e^{j\varphi_2} & 0 & 0 \\ \sqrt{1 - |\Gamma|^2} e^{j\varphi_2} & -\Gamma e^{j(2\varphi_2 - \varphi_1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь предполагается, что при прохождении локальной неоднородности не происходит дополнительной группировки пучка.

Уравнения, использованные при расчете матриц передачи для однородных и неоднородных участков пространства взаимодействия, будут выведены далее.

Таким образом, все матрицы, необходимые для расчета полной матрицы передачи многосекционной ЛБВ, определены.

Знание полной матрицы передачи позволяет сформулировать две задачи по исследованию режимов работы ЛБВ.

1. *Линейный режим усиления:* в этом режиме во входном волноводе существуют волны, распространяющиеся в обе стороны (входной сигнал  $a_{+,вх}$  и отраженная от входа лампы волна  $a_{-,вх}$ ), а в выходном волноводе существует только прошедшая через систему волна. Таким образом, следует положить  $a_{-,вых} = 0$ . Из этого условия можно найти связь между падающей и отраженной волнами во входном волноводе, а также коэффициент усиления  $G$  дБ, выраженный через элементы полной матрицы передачи. Это соотношение имеет вид

$$G = 20 \lg \left( M_{11} - \frac{M_{12}M_{21}}{M_{22}} \right).$$

2. *Режим самовозбуждения:* в этом режиме волны, распространяющиеся в сторону пространства взаимодействия во входном и выходном волноводах, отсутствуют, в существуют только волны, бегущие от лампы (см. рис. 2). Это соответствует условиям  $a_{+,вх} = 0$ ,  $a_{-,вых} = 0$ ,  $a_{-,вх} \neq 0$  и  $a_{+,вых} \neq 0$ . Их одновременное выполнение возможно, только если справедливо уравнение

$$M_{22} = 0,$$

которое представляет собой условия паразитного самовозбуждения ЛБВ.

## 2. Вывод формул для матрицы передачи участка взаимодействия

Для расчета матрицы передачи отдельной секции замедляющей системы воспользуемся методом эквивалентных схем [1, 3]. Если участок взаимодействия является неоднородным, то элементы эквивалентной схемой будут являться функциями продольной координаты (рис. 3).

Будем считать, что пучок фокусируется сильным магнитным полем, так что можно использовать одномерную модель ЛБВ. Кроме того, предполагается наличие постоянного градиента потенциала вдоль длины трубки, и пучок в целом нейтрально заряжен благодаря присутствию ионов, которые препятствуют силам пространственного заряда.

Уравнения, описывающие взаимодействие волн тока и напряжения

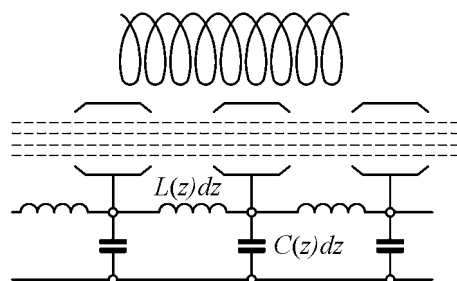


Рис. 3. Эквивалентная схема замены спиральной замедляющей системы проводящей линией

в передающей линии с волнами пространственного заряда в пучке, в этом случае имеют вид [3]

$$\begin{aligned} \left[ \frac{d}{dz} \pm j\beta_c(z) \right] a_{c\pm}(z) &= -\frac{1}{2} \left[ \frac{d}{dz} \ln Z_c(z) \right] a_{c\mp}(z) \pm \\ &\pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_c(z)}{Z_b(z)}} \frac{d}{dz} (a_{b+}(z) - a_{b-}(z)), \\ \left[ \frac{d}{dz} + j(\beta_e(z) \mp \beta_q(z)) \right] a_{b\pm}(z) &= -\frac{1}{2} \left[ \frac{d}{dz} \ln Z_c(z) \right] a_{b\mp}(z) + \\ &+ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_c(z)}{Z_b(z)}} \frac{d}{dz} (a_{c+}(z) + a_{c-}(z)), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\beta_e(z) = \omega/u_0(z)$ ;  $\beta_q(z) = \omega_q/u_0(z)$ ;  $\omega_q$  – редуцированная плазменная частота;  $u_0(z)$  – постоянная составляющая скорости пучка;  $Z_c(z) = \sqrt{L(z)/C(z)}$  – характеристический импеданс линии передачи;  $Z_b(z) = 2V_0(z)\omega_q/|I_0|\omega$  – импеданс пучка;  $\beta_c(z) = \omega/v_c(z) = \omega\sqrt{L(z)C(z)}$  – постоянная распространения волны в линии передачи;  $v_c(z) = 1/\sqrt{L(z)C(z)}$  – фазовая скорость волны;  $V_c(z)$ ,  $I_c(z)$  – ВЧ напряжение и ток в линии;  $L(z)$ ,  $C(z)$  – погонные индуктивность и емкость линии;  $i_1(z)$  – ВЧ ток пучка;  $I_0$  – постоянный ток пучка;  $V_1(z) = mu_0(z)u_1(z)/|e|$  – кинетический потенциал пучка;  $u_0(z)$  – постоянная скорость пучка;  $u_1(z)$  – ВЧ скорость пучка;  $m$  – масса электрона;  $e$  – заряд электрона;  $V_0(z)$  – постоянная составляющая потенциала пучка. Комплексные амплитуды прямой и встречной волн в линии передачи определяются соотношениями  $a_{c\pm}(z) = [V_c(z) \pm Z_c(z)I_c(z)]/(4\sqrt{Z_c(z)})$ , а комплексные амплитуды волн пространственного заряда в пучке – соотношениями  $a_{b\pm}(z) = [V_1(z) \mp Z_b(z)i_1(z)]/(4\sqrt{Z_b(z)})$ . Заметим, что система уравнений (5) в случае однородной замедляющей системы (ЗС) и постоянного потенциала пучка переходит в уравнения линейной теории ЛБВ с учетом встречного излучения, представленные в форме уравнений связанных волн [5].

Система уравнений (5) учитывает механизмы взаимодействия прямой и встречной волн в неоднородной ЗС. Коэффициент связи между ними [3,4] равен  $K = (1/Z_c)(dZ_c/dx)$ . Здесь  $Z_c$  – волновое сопротивление передающей линии, определяемое соотношением  $Z_c = 2P/|I_0|^2$ ;  $P$  – мощность, переносимая вдоль замедляющей системы в режиме бегущей волны;  $I_0$  – амплитуда нулевой пространственной гармоники тока, текущего по спирали. Таким образом, для расчета условий самовозбуждения неоднородной ЛБВ, помимо традиционных электродинамических параметров – дисперсии, сопротивления связи и коэффициента затухания – необходимо также знать зависимость коэффициента связи прямой и встречной волн от частоты в рабочей полосе прибора. Волновое сопротивление  $Z_c$  не совпадает по значению с сопротивлением связи, так как сопротивление связи отвечает за связь потока мощности с напряженностью электрического поля на оси системы, а волновое сопротивление связывает поток мощности с током, текущим по спирали ЗС.

Необходимо рассматривать взаимодействие прямой и обратной волн электронного потока. Если есть граничные условия на концах системы и скачкообразных неоднородностях, то учитываются все отражения. Связь между прямой и обратной

волнами возникает из-за неоднородности замедляющей структуры. Наличие обратной связи отвечает за процессы самовозбуждения лампы.

Для расчетов значения волнового сопротивления по полученной модели можно использовать, например, программы трехмерного анализа, такие как Comsol и HFSS.

Система уравнений для однородных участков взаимодействия решалась методом преобразования Лапласа, что позволило найти распределение полей прямой и встречной волн, а также сгруппированного тока вдоль пространства взаимодействия и вычислить необходимые элементы матрицы передачи. В случае неоднородной системы, уравнения для элементов матриц передачи участков взаимодействия решались численно с использованием возможностей компьютерной программы Mathematica.

### 3. Результаты моделирования режимов линейного усиления

**Пример 1.** В качестве примера использования программы рассматривается расчет односекционной ЛБВ с отражениями на концах. Параметры прибора приведены в табл. 1.

Необходимые для расчета параметры спиральной замедляющей системы были рассчитаны с использованием оперативной программы расчета электродинамических параметров спиральной ЛБВ [6] по ее геометрическим размерам. Полученные зависимости коэффициента замедления  $n$  и сопротивления связи  $R$  на оси системы от частоты приведены на рис. 4. Из графика зависимости замедления от частоты видно, что при выбранных значениях параметров спирали дисперсия в широком диапазоне частот носит аномальный характер. ЗС с аномальной дисперсией часто используется в широкополосных ЛБВ для получения высокого коэффициента усиления.

В качестве теста на правильность работы разработанной программы можно сравнить полученные с ее помощью результаты с данными расчета по программе TWT1D, которая является составным модулем комплекса программ расчета режимов многочастотного усиления в широкополосных спиральных ЛБВ [7]. В нелинейной программе во входных данных задавалась малая амплитуда входного сигнала для того, чтобы лампа работала в линейном режиме и можно было произвести корректное сопоставление результатов.

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента усиления от частоты, полученные с использованием обеих программ для трех значений тока пучка. Как видно из рисунка, результаты расчетов хорошо совпадают между собой, а различие между ними объясняется тем, что в программе TWT1D (на графике – штриховые линии) не учитывается взаимодействия пучка со встречной волной.

Таблица 1  
Параметры рассчитываемого прибора

Параметр лампы	Физический смысл	Значение
$L$	Длина лампы	0.1 м
$a$	Радиус пролетной трубы	0.69 мм
$b$	Радиус пучка	0.487 мм
$V_0$	Напряжение пучка	4500 В
$I_0$	Постоянный ток	0.115 А

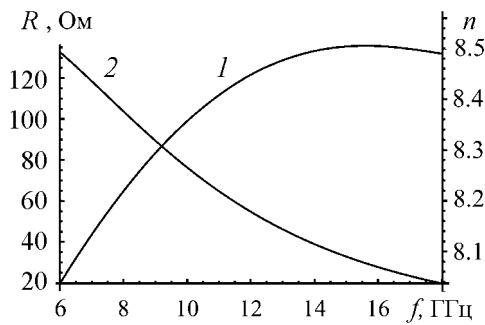


Рис. 4. Зависимость замедления в системе (кривая 1) и сопротивления связи (кривая 2) от частоты

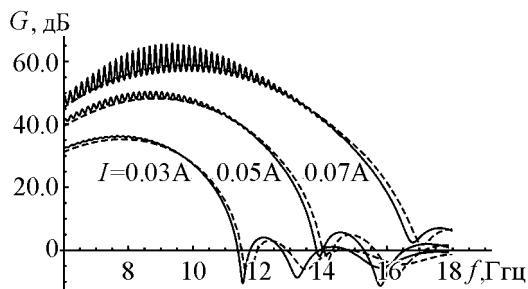


Рис. 5. График зависимости коэффициента усиления от частоты для линейного режима при  $\Gamma = 0$  (сплошная линия) и нелинейного режима с малой амплитудой входного сигнала (штриховая линия)

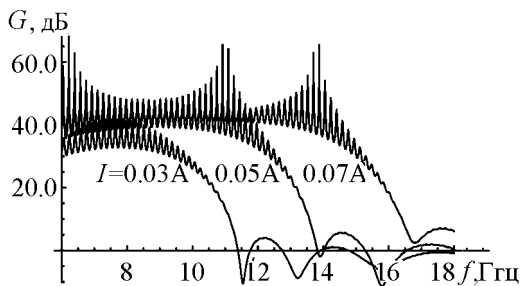


Рис. 6. График зависимости коэффициента усиления от частоты при  $\Gamma = 0.1$

Также на графике наблюдаются области резкого возрастания коэффициента усиления, которые свидетельствуют о склонности системы к паразитной генерации при данных значениях параметров.

Также на графике наблюдаются области резкого возрастания коэффициента усиления, которые свидетельствуют о склонности системы к паразитной генерации при данных значениях параметров.

**Пример 2.** В качестве примера использования программы для расчёта усиления в многосекционной ЛБВ рассматривается лампа фирмы Northrop Grumman Corp. [4], работающая в частотном диапазоне от 3 до 10 ГГц. Параметры прибора приведены в табл. 2 и на рис. 7.

На рис. 8 приведены зависимости коэффициента усиления от частоты, полученные с использованием программы на основе описанного ранее алгоритма

Теперь рассмотрим, как влияет на процессы усиления введение отражений от концов системы. На рис. 6 представлены зависимости коэффициента усиления от частоты при напряжении в 4500 В и модуле коэффициента отражения от обоих концов системы  $|\Gamma| = 0.1$  для трех различных значений тока пучка (для случая отсутствия отражения соответствующие данные приведены на рис. 5 сплошными линиями).

На графике коэффициента усиления наблюдаются небольшие осцилляции, обусловленные влиянием встречного излучения. При увеличении тока пучка происходит увеличение осцилляций, что является следствием роста параметра Пирса  $C$ , от значения которого зависит уровень встречного излучения.

При введении небольшого отражения осцилляции будут увеличиваться, а диапазон частот – расширяться. Это будет происходить вследствие того, что помимо обратной волны с прямой волной также будет взаимодействовать и отраженная волна. Степень этого взаимодействия увеличивается с ростом коэффициента отражения в системе. Расстояние между пиками колебаний коэффициента усиления может быть рассчитано из условия, что на электронной длине лампы должно укладываться целое число полувольт. Используя геометрические параметры системы, из этого условия легко получить, что расстояние между соседними пиками должно составлять примерно 176 МГц. Эта же величина, определенная по рассчитанным графикам, получается равной 166 МГц, что хорошо соответствует теоретической оценке.

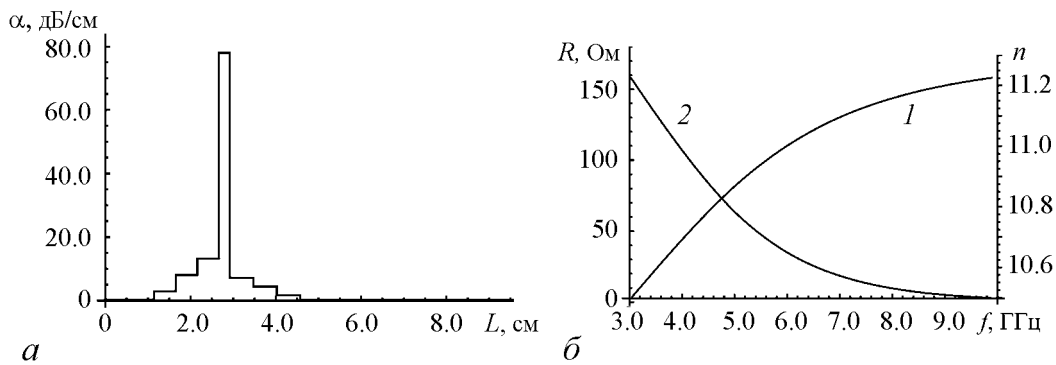


Рис. 7. *a* – кусочно-линейная зависимость коэффициента затухания  $\alpha$  на всех участках взаимодействия для реальной ЛБВ; *b* – коэффициент замедления  $n$  (1) и сопротивление связи  $R$  (2)

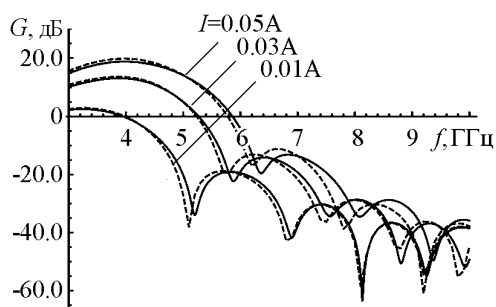


Рис. 8. График зависимости коэффициента усиления от частоты для линейного режима при  $\Gamma = 0$  (сплошная линия) и нелинейного режима с малой амплитудой входного сигнала (штриховая линия)

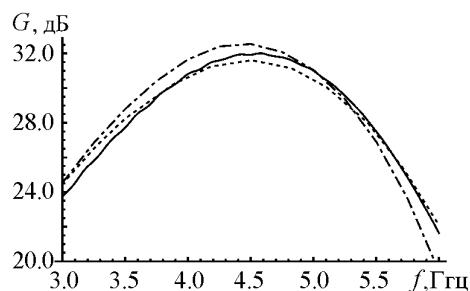


Рис. 9. График зависимости коэффициента усиления от частоты: сплошная линия – расчет по разработанной программе; штрих-пунктир – расчет по программе TWT1D; пунктир – расчет по программе CHRISTINE1D

и программы TWT1D для трех значений тока пучка и при напряжении  $V_0 = 3000$  В. Как видно из графика, в диапазоне частот, где величина коэффициента усиления положительна, расхождения между результатами данных программ незначительны при малых значениях тока пучка и без учета отражений от концов системы.

Также можно произвести сравнение полученных результатов с данными, рассчитанными по программам TWT1D и CHRISTINE1D [4]. Параметры прибора приведены в табл. 2 для тока пучка  $I_0 = 0.1$  А. Результаты такого сравнения приведены на рис. 9. Из рисунка видно, что результаты всех трех программ хорошо совпадают между собой. Небольшое различие в коэффициенте усиления связано, вероятно, с различными способами расчета коэффициента редукции пространственного заряда, которые используются в каждой из этих программ.

Таблица 2  
Параметры рассчитываемого прибора

Параметр лампы	Физический смысл	Значение
$L$	Длина лампы	95.76 мм
$a$	Радиус пролетной трубы	1.2446 мм
$b$	Радиус пучка	0.5 мм
$V_0$	Напряжение пучка	3000 В
$I_0$	Постоянный ток	0.17 А



#### 4. Анализ паразитной генерации в многосекционной ЛБВ за счет отражений от концов пространства взаимодействия

Таблица 3  
Параметры рассчитываемого прибора

Параметр лампы	Название и размерность	Значение
$L$	Длина лампы	100 мм
$a$	Радиус пролетной трубы	0.6125 мм
$b$	Радиус пучка	0.45 мм
$V_0$	Напряжение пучка	3500 В
$i_0$	Постоянный ток	0.1 А

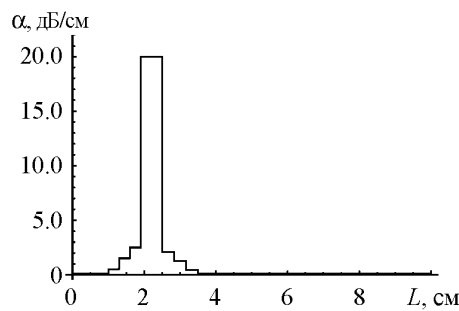


Рис. 10. Зависимость коэффициента затухания  $\alpha$  в системе от продольной координаты вдоль пространства взаимодействия

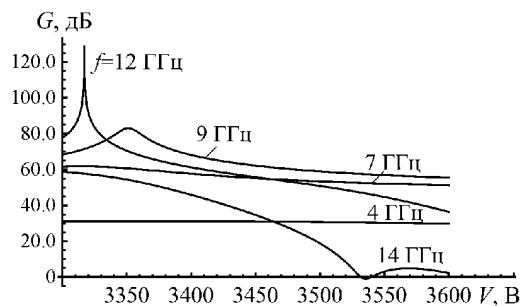


Рис. 11. Зависимость коэффициента усиления  $G$  от напряжения  $V$  при различных значениях частоты (величина затухания на локальном поглотителе 20 дБ/см)

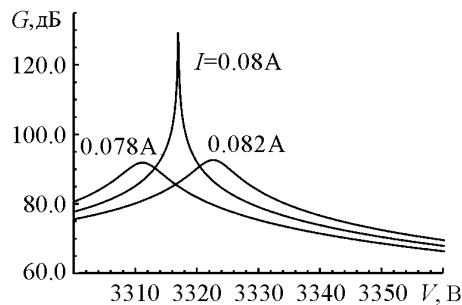


Рис. 12. Зависимость коэффициента усиления  $G$  от напряжения  $V$  для различных значений тока пучка на частоте 12 ГГц

В качестве примера исследования одного из механизмов самовозбуждения ЛБВ рассматривается расчет многосекционной ЛБВ с отражениями на концах. Параметры прибора приведены в табл. 3.

Для начала рассмотрим лампу длиной 10 см с коэффициентом отражения от выходного волновода 10% (считаем, что между секциями отражения отсутствуют) и величиной погонного затухания в локальном поглотителе 20 дБ/см. Закон изменения коэффициента затухания вдоль пространства взаимодействия представлен на рис. 10. Как из него следует, в расчетах моделируется не только область сильного затухания в поглотителе, но и согласующие участки до и после него, которые служат для уменьшения отражений внутри лампы.

Поскольку уровень затухания в поглотителе мал, то самовозбуждение за счет отражений возникает при токах, меньших рабочего значения 0.1 А. Рассмотрим, например, случай, когда постоянный ток пучка  $I_0 = 0.08$  А. На рис. 11 представлена зависимость коэффициента усиления от напряжения при различных значениях частоты. Как видно из графика, пик самовозбуждения наблюдается на частоте близкой к 12 ГГц при напряжении меньше 3500 В (рабочее напряжение прибора). Также на частоте 9 ГГц наблюдается экстремум коэффициента усиления, который не свидетельствует о склонности к самовозбуждению при данном значении тока. Как видно из графика, кривые, соответствующие другим частотам, не имеют максимумов при данных значениях тока и напряжения.

На рис. 12 приведены зависимости коэффициента усиления этой же

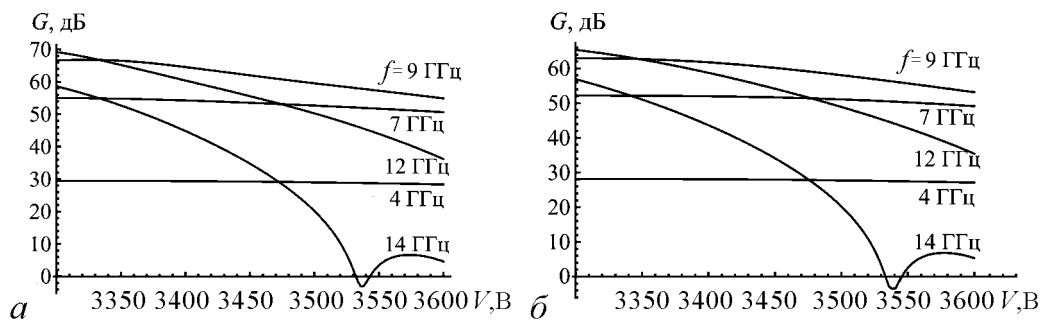


Рис. 13. Зависимость коэффициента усиления от напряжения при различных значениях частоты (величина затухания на локальном поглотителе 40 дБ/см(а) и 80 дБ/см(б))

лампы от напряжения для различных значений тока пучка. Частота сигнала фиксирована и равна 12 ГГц. Видно, что при токе пучка  $I_0 = 0.078$  А в области напряжений, близких к значению  $V_0 = 3310$  В, наблюдается локальный максимум, который свидетельствует о склонности системы к паразитной генерации при данном значении напряжения. При увеличении тока до значения  $I_0 = 0.08$  А максимум на кривой усиления становится очень острым и принимает большие значения. Это свидетельствует о начале генерации. При дальнейшем увеличении тока пучка зависимость  $G(V_0)$  вновь сглаживается и значение коэффициента усиления в максимуме возвращается к стандартным значениям для выбранной длины лампы. Такое поведение коэффициента усиления при изменении тока пучка свидетельствует о том, что значение стартового тока  $I_{st}$  на частоте 12 ГГц примерно равно 0.08 А, а напряжение  $V_{st}$ , при котором возникает генерация, примерно равно 3318 В.

Дальнейшие вычисления проводятся для значений коэффициента затухания на локальном поглотителе, равных 40 дБ/см и 80 дБ/см. Величина затухания на областях согласования около локального поглотителя увеличивается по сравнению со значениями, приведенными на рис. 10, соответственно, в 2 и 4 раза. Полученные зависимости представлены на рис. 13. Как видно из графиков, уже при значении затухания на поглотителе 40 дБ/см (рис. 13, а) полностью пропали пики самовозбуждения и экстремумы коэффициента усиления. При дальнейшем увеличении затухания на поглотителе до 80 дБ/см представленные зависимости коэффициента усиления от напряжения изменяются достаточно слабо, новые экстремумы не появляются.

Как видно из этих графиков, при увеличении затухания на локальном поглотителе до значений, соответствующих реальному прибору, самовозбуждение, вызванное отражением от концов системы, легко подавляется, а зависимость коэффициента усиления от напряжения при заданном токе для различных частот в данном диапазоне напряжений и величине тока 0.08 А стабилизируется.

### Заключение

В статье развита методика и численные алгоритмы, описывающие процессы взаимодействия электронного пучка с электромагнитными полями в широкополосных многосекционных спиральных ЛБВ с изменяющимися вдоль пространства взаимодействия электродинамическими параметрами.

С помощью программы разработанной методики численного моделирования была создана программа на языке компьютерной системы Mathematica, предназначенная для анализа режимов линейного усиления и самовозбуждения в широкополосных спиральных ЛБВ. Проведен расчет коэффициента линейного усиления в широкополосных неоднородных ЛБВ со спиральной замедляющей системой и сравнительный анализ полученных результатов с результатами ранее известными данными, показано хорошее соответствие между ними.

Разработанные алгоритмы и программа могут быть непосредственно модифицированы с целью учета других механизмов паразитной генерации в широкополосных ЛБВ, прежде всего самовозбуждения за счет взаимодействия с обратной гармоникой встречной волны.

Автор выражает благодарность А.Г. Рожневу за постановку задачи и полезные обсуждения.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-02-01280а).*

#### **Библиографический список**

1. *Пирс Дж.* Лампа с бегущей волной. М.: Сов. радио, 1952.
2. *Альтман Дж. Л.* Устройства сверхвысоких частот. М.: Мир, 1968.
3. *Haddad G.I., Bevensee R.M.* Start-oscillation conditions of tapered backward-wave oscillators // IEEE Transactions on Electron Devices. 1963. Vol. 10. P. 389.
4. *Antonsen T.M., Safier Jr.P., Chernin D.P., Levush B.* Stability of traveling-wave amplifiers with reflections // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30, № 3. P. 1089.
5. *Цейтлин М.Б., Кац А.М.* Лампа с бегущей волной: Вопросы теории и расчета. М.: Сов. радио, 1964.
6. *Рожнев А.Г., Соколов Д.В.* Расчет электродинамических характеристик спиральных замедляющих систем широкополосных ЛБВ: Учебно-методическое пособие. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2004.
7. *Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sokolov et al.* New 2.5D code for modeling of nonlinear multisignal amplification in a wide-band helix traveling wave tube // Fifth IEEE Int. Vac. Electr. Conf. (IVEC2004). 2004. Monterey, USA. P. 144.

*Саратовский государственный  
университет им. Н.Г. Чернышевского*

*Поступила в редакцию 28.08.2012*

#### **LINEAR THEORY OF MULTISECTION BROADBAND TWT WITH INHOMOGENEOUS HELIX SLOW WAVE STRUCTURE**

*T. A. Karetnikova*

We present the mathematical models, computer code and numerical analysis for modeling linear operation regimes of broadband helix travelling-wave tube (TWT) with the inhomogeneous slow wave structure along the interaction space. One-dimensional

model of the interaction of the forward and reflected electromagnetic waves with an electron beam in a inhomogeneous section of the slow wave structure was researched. The calculation method of the linear gain and self-excitation conditions of multisection TWT was suggested. The gain dependence on the frequency and the beam voltage in the absence of and taking into account the reflections was studied. We compared the results of described parametric code and the computer simulation by the one-dimensional parametric codes CHRISTINE1D and TWT1D.

*Keywords:* Traveling wave tube, helix slow wave structure, gain, parasitic generation.



*Каретникова Татьяна Андреевна* – родилась в Саратове (1990), окончила факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2012). Принимала участие в качестве докладчика на конференциях «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (2009–2012), «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (2010, 2012), «Нанoeлектроника, нанofотоника и нелинейная физика» (2010, 2012). Стипендиат Благотворительного фонда В. Потанина. В настоящее время является аспирантом первого года обучения в СГУ на кафедре нелинейной физики факультета нелинейных процессов. Область научных интересов – вакуумная СВЧ-электроника, нелинейные колебания и волны.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: [karetnikovat@mail.ru](mailto:karetnikovat@mail.ru)