



К НЕЛИНЕЙНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕОРИИ ДВУХЛУЧЕВОЙ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ И ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОЙ ЛАМПЫ: ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ*

С. С. Волощук

Национальный исследовательский
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
E-mail: ss.voloshchuk@gmail.com

Приведен вариант построения нелинейной нестационарной теории двухлучевой лампы бегущей волны с попутными потоками, основанный на нелинейной теории лампы бегущей волны с одним электронным пучком.

Необходимость построения теории двухлучевой лампы бегущей волны возникла в связи с исследованием электронно-волновой лампы. Электронно-волновая лампа состоит из входного, выходного устройства и пространства дрейфа, где взаимодействуют два электронных потока. Во входном устройстве происходит модуляция электронных пучков, которые взаимодействуют между собой в пространстве дрейфа благодаря явлению двухлучевой неустойчивости. В качестве входного и выходного устройства можно использовать отрезки спирали, таким образом, входное и выходное устройства будут являться короткими секциями двухлучевой ЛБВ. Электронно-волновая лампа из-за отсутствия замедляющей системы является перспективным прибором для продвижения в терагерцовую область.

Цель данной работы состоит в построении нелинейной нестационарной теории двухлучевой ЛБВ с попутными пучками. В настоящее время существует много работ, посвященных двухлучевой неустойчивости, гораздо меньше работ посвящены конкретным двухлучевым приборам, причем ни одна из них не рассматривает нестационарные модели.

Полученная в работе система уравнений решалась численно, методом частиц в ячейках. Проведено тестовое сравнение результатов построенной теории с нелинейными уравнениями электронно-волновой лампы, которое показало корректность выведенных уравнений. Приведено сравнение работы двухлучевой ЛБВ и электронно-волновой лампы в нестационарной области рабочих параметров и в области интерференции. Приведено сравнение электронно-волновой лампы, в которой входное и выходное устройства моделируются секциями ЛБВ, с двухлучевой ЛБВ такой же длины.

Ключевые слова: Двухпучковая неустойчивость, электронно-волновая лампа, двухлучевая лампа бегущей волны.

DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-5-62-71

Ссылка на статью: Волощук С.С. К нелинейной нестационарной теории двухлучевой лампы бегущей волны и электронно-волновой лампы: Основные уравнения и некоторые результаты расчетов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, № 5. С. 62–71.

*Работа написана по материалам доклада «Некоторые результаты нелинейной нестационарной теории двухлучевой лампы бегущей волны и электронно-волновой лампы» на XI международной школе «Хаотические автоколебания и образование структур», 3–7.10.2016, Саратов, Россия.

Введение

В настоящее время растет интерес к устройствам, которым раньше уделялось мало внимания из-за технологических ограничений, связанных с их изготовлением. Одним из таких устройств является электронно-волновая лампа (ЭВЛ). Благодаря своей конструкции электронно-волновая лампа является перспективным прибором для продвижения в терагерцовую область. Особенностью ЭВЛ является отсутствие замедляющей системы: она состоит из входного, выходного устройств и пространства дрейфа, в котором происходит взаимодействие между двумя электронными потоками.

Таким образом, лампу можно разделить на две области: область дрейфа, где происходит взаимодействие пучков, и области, где происходит ввод и вывод энергии – входное и выходное устройства.

Для пространства дрейфа предложено несколько теорий, например, в работе [1] – линейная теория для попутных и встречных пучков, [2, 3] – нелинейная теория для попутных пучков; в предыдущей работе автора [4] были получены уравнения для нелинейного нестационарного случая попутных и встречных пучков.

В качестве входного и выходного устройств будем рассматривать короткую секцию двухлучевой лампы бегущей волны (ЛБВ). Для двухлучевой ЛБВ предложена нелинейная стационарная теория [5]. Цель данной работы состоит в создании нелинейной нестационарной модели двухлучевой ЛБВ для моделирования входного и выходного устройства в ЭВЛ.

Построение теории

Для построения нестационарной теории воспользуемся идеологией нелинейной стационарной теории лампы бегущей волны, представленной, например, в [6–8]. Напомним, что эта теория построена в следующих предположениях:

- движение электронов одномерно;
- электроны движутся только в одну сторону, то есть невозможен их разворот, но возможен обгон;
- движение электронов нерелятивистское;
- в замедляющей системе возбуждается только одна гармоника поля;
- замедляющая система идеально согласована.

В безразмерных переменных уравнения для этой модели записываются в следующем виде (см., например, [6–8]):

$$\begin{aligned} -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \left(1 + C_0 \frac{\partial u}{\partial x}\right)^3 (\operatorname{Re}(F e^{ju}) + F_q), \\ \frac{\partial F}{\partial x} + jbF &= -(1 + bC_0)^2 I(x), \\ I(x) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-ju} du_0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь x – безразмерная координата; $u = \omega t - \beta_e x$ – фаза крупной частицы; F – поле волны в замедляющей системе; F_q – поле пространственного заряда; C_0 – параметр

усиления; $b = -(v_\phi - v_0)/(v_\phi C_0)$, где v_ϕ – фазовая скорость волны, v_0 – начальная скорость электронов (в дальнейших уравнениях для двух пучков под v_0 будем понимать среднеарифметическое значение начальных скоростей потоков); I – первая гармоника тока; ω – круговая частота; j – мнимая единица.

Для случая двух пучков записываются два уравнения движения, в которых слабое F_q для каждого уравнения удобно взять из стационарной нелинейной теории двухлучевой электронной лампы [6,7]. Тогда для первого и второго пучка выражение для поля записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} F_{q1} &= \frac{j_{10}\lambda_{11}(x, t_0) + j_{20}\lambda_{21}(x, t_0)}{j_{10} + j_{20}}, \\ F_{q2} &= \frac{j_{10}\lambda_{12}(x, t_0) + j_{20}\lambda_{22}(x, t_0)}{j_{10} + j_{20}}, \\ \lambda_{kj}(x, t_0) &= \int_0^{2\pi} D_{kj} \left(\omega t_k \left(x, \frac{t'_0}{\omega} \right) - \omega t_j \left(x, \frac{t_0}{\omega} \right) \right) dt'_0, \\ D_{kj}(x) &= \frac{\pi - x}{2\pi}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, может быть получена система уравнений, описывающая стационарный случай системы двух взаимодействующих электронных потоков, движущихся вдоль замедляющей системы, по которой может распространяться электромагнитная волна.

Нестационарные уравнения можно получить, применяя феноменологический метод, описанный, например, в [9]. Он заключается в замене оператора d/dx в уравнении возбуждения

$$\frac{d}{dx} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} - \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t}, \quad (3)$$

где $v = V/v_0$ – безразмерная групповая скорость электромагнитной волны, нормированная на v_0 , и в уравнении движения

$$\frac{d}{dx} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t}. \quad (4)$$

Для простоты считаем параметр C_0 малым и $b = -v_\phi - v_0/v_\phi$, так что окончательно уравнения примут вид

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 u_1 &= - \left(\operatorname{Re} (F e^{ju_1}) + \frac{j_{10}\lambda_{11}(x, t_0) + j_{20}\lambda_{21}(x, t_0)}{j_{10} + j_{20}} \right), \\ \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 u_2 &= - \left(\operatorname{Re} (F e^{ju_2}) + \frac{j_{10}\lambda_{12}(x, t_0) + j_{20}\lambda_{22}(x, t_0)}{j_{10} + j_{20}} \right), \\ \frac{1}{v} \frac{\partial F}{\partial t} - \frac{\partial F}{\partial x} + jrF &= -(1+b)^2 (I_1 + I_2), \\ I(x) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-ju} du, \\ \lambda_{kj}(x, t_0) &= \int_0^{2\pi} D_{kj} \left(\omega t_k \left(x, \frac{t'_0}{\omega} \right) - \omega t_j \left(x, \frac{t_0}{\omega} \right) \right) dt'_0, \\ D_{kj}(x) &= \frac{\pi - x}{2\pi}. \end{aligned} \quad (5)$$

Переходя от производных к конечно-разностным соотношениям, можно получить удобные выражения для численного решения. Для этого введем функцию $v = \partial u / \partial t + \partial u / \partial x$. Тогда уравнение движения запишется в следующем виде:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} = -f(\lambda). \quad (6)$$

Переходя к конечно-разностным соотношениям в этом уравнении, получим

$$\frac{v(x, t + \Delta t) - v(x, t)}{\Delta t} + \frac{v(x + \Delta x, t) - v(x, t)}{\Delta x} = -f(\lambda), \quad (7)$$

$$v(x + \Delta x, t) = v(x, t) - \frac{\Delta x}{\Delta t} (v(x, t + \Delta t) - v(x, t)) - \Delta x \cdot f(\lambda)$$

Аналогично последнему выражению записывается выражение для u и F .

Проверка модели. Сравнение с известными результатами для электронно-волновой лампы

Очень важно убедиться в корректности полученных уравнений. Наиболее близки к ним уже упомянутые уравнения нелинейной теории двухлучевой электронной лампы [2], результаты решения которых приведены в работе [3].

Для сравнения с результатами из [3] уберем из полученной нами системы уравнение возбуждения и, решая оставшиеся при одинаковых с [3] параметрах, построим графики траекторий электронов (рис. 1) и распределения тока (рис. 2).

Построенные графики (см. рис. 1 и 2) достаточно близки, что позволяет говорить о том, что нестационарная модель построена корректно, по крайней мере, для случая ЭВЛ.

В линейной теории ЭВЛ можно выделить две области рабочих параметров: область неустойчивости и область интерференции. Область неустойчивости характеризуется существованием экспоненциально возрастающей парциальной волны. В области интерференции существует четыре парциальные волны с постоянной амплитудой.

Для нестационарной модели ЭВЛ, как и в работе [4], можно построить кривые распределения тока в области двухпучковой неустойчивости и в области интерференции (рис. 3). Верхние графики на рис. 3 соответствуют области неустойчивости, так как наблюдается постоянный рост тока, нижние можно считать областью интерференции. Однако линейная модель не учитывает обгон электронов, который играет большую роль в этом случае. Прямое сравнение с линейной моделью ЭВЛ [4] затруднительно из-за использования разных способов введения безразмерных величин.

Возвращая теперь в нестационарную модель уравнение возбуждения, можно находить для лампы бегущей волны с двумя потоками (ЛБВЭВЛ) зависимости от тех же параметров, но с учетом влияния замедляющей системы для области неустойчивости (рис. 4) и области интерференции (рис. 5). Распределения токов для ЛБВЭВЛ на рис. 4 и 5 приведены в сравнении с распределениями токов для ЭВЛ.

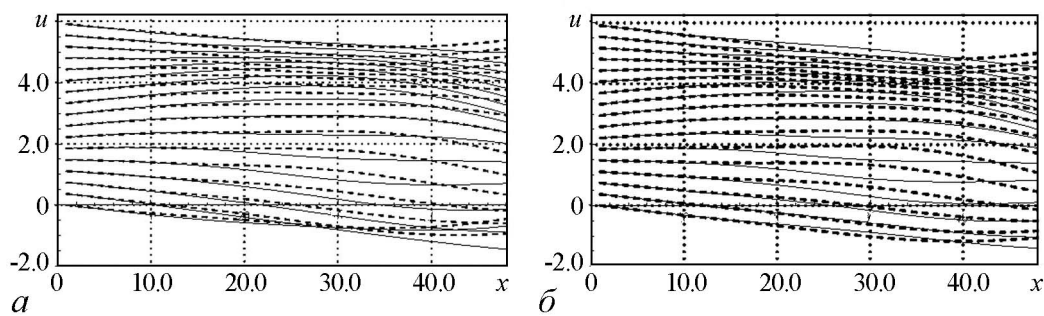


Рис. 1. Сравнение траекторий электронов для модели ЭВЛ [3] (а) и нестационарной модели (б); сплошной линией показаны траектории электронов первого пучка, прерывистой – второго

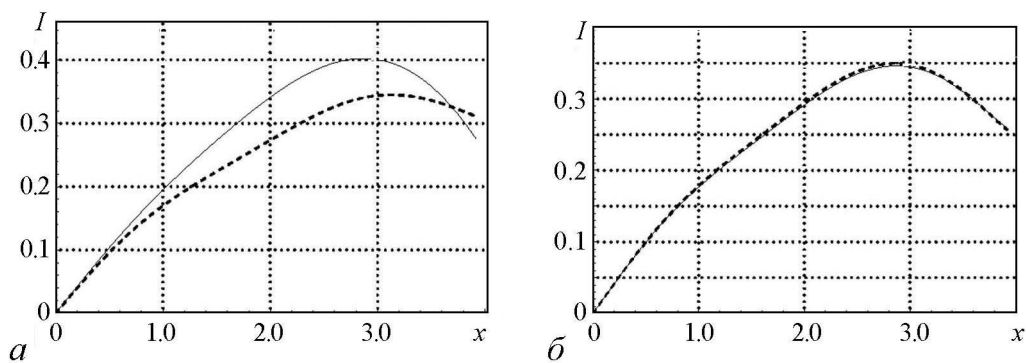


Рис. 2. Сравнение распределений токов для модели ЭВЛ [3] (а) и нестационарной модели (б); сплошной линией показано распределение плотности тока первого пучка, прерывистой – второго

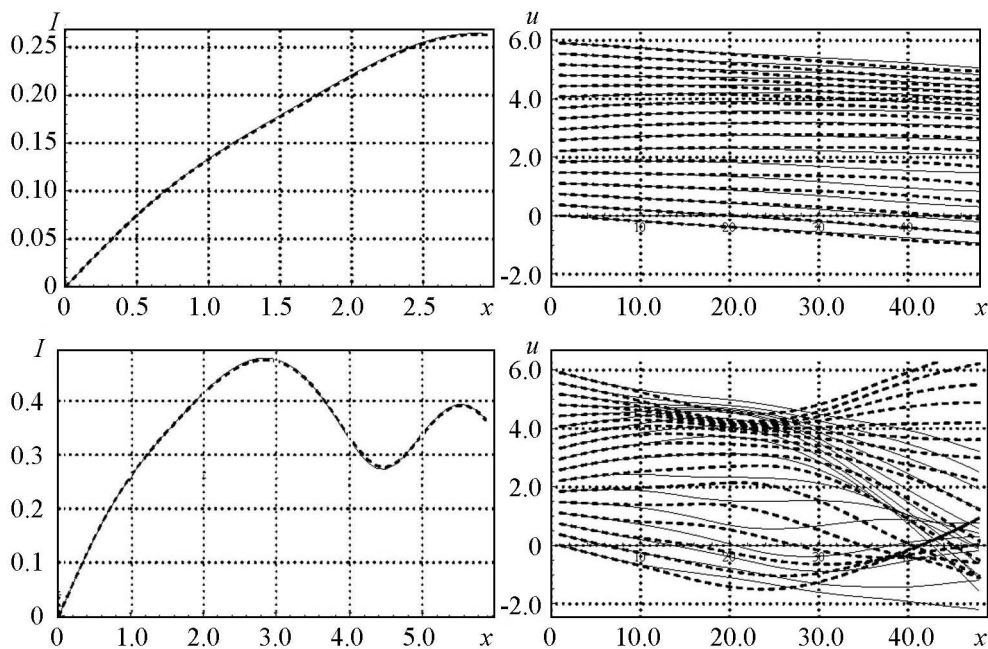


Рис. 3. Область неустойчивости (сверху) и область интерференции (снизу) в нестационарной модели

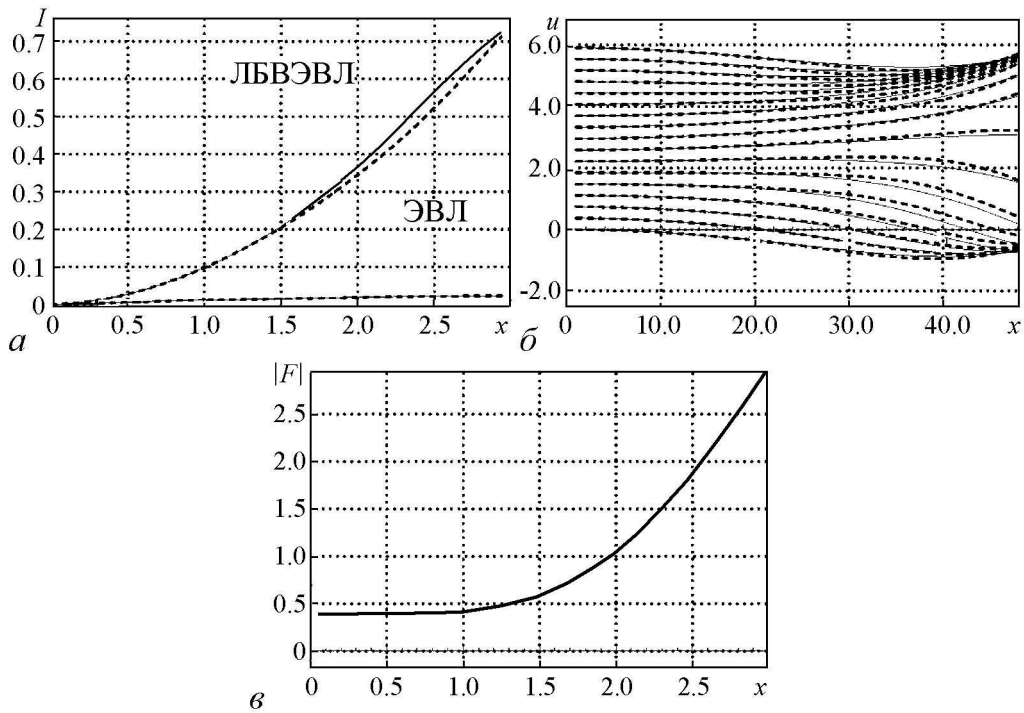


Рис. 4. Распределения токов (а), траектории электронов (б) и распределение поля (в) для области неустойчивости, сплошные кривые относятся к первому пучку, прерывистые – ко второму

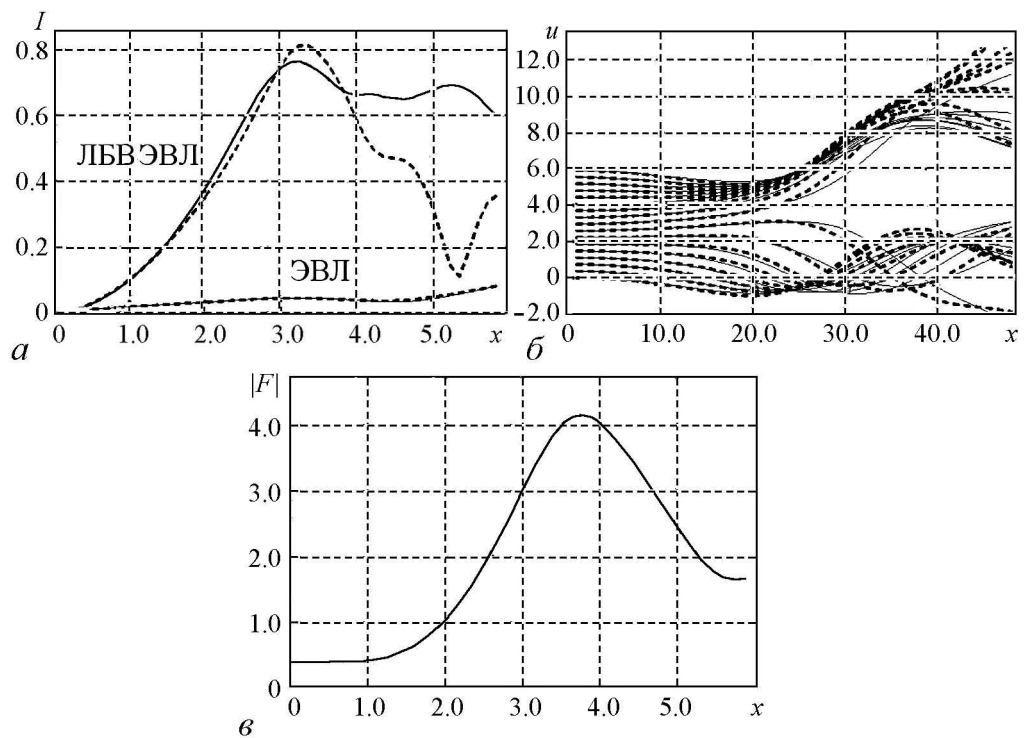


Рис. 5. Распределения токов (а), траектории электронов (б) и распределение поля (в) для области интерференции; сплошные кривые относятся к первому пучку, прерывистые – ко второму

С введением замедляющей системы амплитуды токов значительно увеличиваются, но поведение модели качественно не изменяется: в области неустойчивости наблюдается рост амплитуды тока, в области интерференции наблюдается пульсирующее поведение кривых тока и поля.

Выше для всех вычислений мы полагали параметр рассинхронизма b малым, но для косвенной проверки построенной модели можно построить распределения поля при различных параметрах b (рис. 6). Из рисунков видно, как и можно было ожидать, при росте b амплитуда возбуждаемого поля в замедляющей системе падает.

Для рассмотренных параметров временные характеристики не демонстрируют какой-либо интересной динамики и приходят в стационарное состояние практически сразу после «прилета» крупных частиц в соответствующую точку вычислительной сетки. На рис. 7 хорошо виден треугольник в плоскости (x, t) с нулевым полем, в котором еще нет крупных частиц и оставшаяся часть области (x, t) со стационарным распределением поля $|F|$.

Объединим теперь уравнения для двухлучевой ЛБВ и ЭВЛ так, чтобы ЛБВ на концах прибора моделировала входное и выходное устройство, а ЭВЛ в центре моделировала область дрейфа.

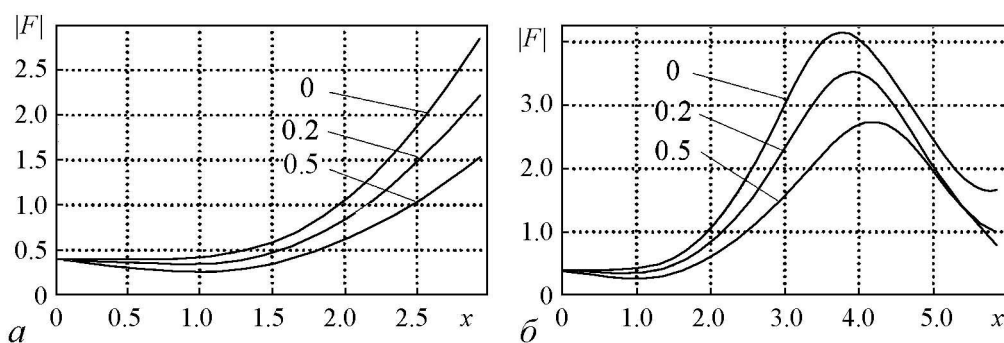


Рис. 6. Распределение поля для нескольких значений параметра рассинхронизма b в области неустойчивости (а) и в области интерференции (б)

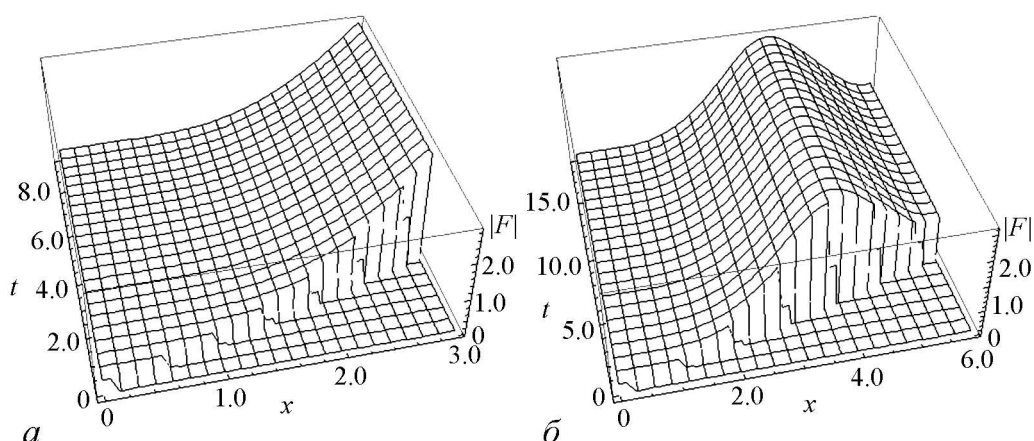


Рис. 7. Распределение поля электромагнитной волны в замедляющей системе в зависимости от координаты и времени в области неустойчивости (а) и области интерференции (б)

На рис. 8 приведены зависимости распределения поля в замедляющей системе двухлучевой ЛБВ в сравнении с ЭВЛ такой же длины с входным и выходным устройством в виде коротких секций двухлучевой ЛБВ. Видно, что в двухлучевой ЛБВ усиление гораздо больше, чем в ЭВЛ.

Заключение

Построенная нелинейная нестационарная модель двухлучевой ЛБВ без учета замедляющей системы демонстрирует близкое поведение в сравнении с известной стационарной нелинейной теорией ЭВЛ, что говорит о корректности построенной модели. При анализе построенной модели двухлучевой ЛБВ нестационарные эффекты модели проявлялись слабо, видимо, это связано с тем, что ЛБВ является усилителем. Возможно, для генератора – двухлучевой ЛОВ – переходные процессы будут заметней.

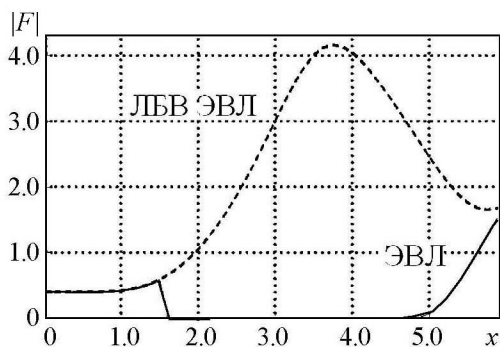


Рис. 8. Распределение поля в замедляющей системе для ЭВЛ с входным и выходным устройством (сплошная линия) и двухлучевой ЛБВ (пунктирная линия)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-02-00238 А и № 16-32-00468 МОЛ А.

Библиографический список

1. Лопухин В.М., Рошаль А.С. Усилитель на встречных электронных потоках // Радиотехника и электроника. 1962. № 4. С. 643.
2. Филимонов Г.Ф. Нелинейная теория двухлучевой электронной лампы. Ч. I. Вывод и исследование уравнений // Радиотехника и электроника. 1959. № 3. С. 489.
3. Филимонов Г.Ф. Нелинейная теория двухлучевой электронной лампы. Ч. II. Результаты Вычислений // Радиотехника и электроника. 1959. № 5. С. 832.
4. Волощук С.С. Нелинейная модель взаимодействия двух электронных потоков и ее тестирование // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2015. № 3. С. 38.
5. Шульга В.Г., Бондаренко Б.Н. Нелинейная теория двухлучевой ЛБВ. Основные уравнения // Сборник «Радиотехника». Харьков: Изд-во ХГУ, 1970. № 14. С. 12.
6. Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. М.: «Сов. Радио», 1975.
7. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: «Сов. Радио», 1973.
8. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2 т. Т.1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
9. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2 т. Т.2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

Поступила в редакцию 13.10.2016

FOR NONLINEAR NONSTATIONARY THEORY OF TWO-STREAM TRAVELING-WAVE TUBE AMPLIFIER AND TWO-STREAM AMPLIFIER: GENERAL EQUATIONS AND SOME RESULTS OF CALCULATION

S. S. Voloshchuk

National Research Saratov State University
Astrahanskaya, 83, 410012 Saratov, Russia
E-mail: ss.voloshchuk@gmail.com

In the work shows a way of developing the theory of nonlinear non-stationary two-beam traveling wave tube with a codirected beams, based on the nonlinear theory of traveling wave tube with a single electron beam.

The need to build a double-beam traveling wave tube theory arose from the study of two-stream amplifier. It consists of an input device, an output device and the drift space, where two electron beams interact. In the input device there is a stream of modulation, which interact with each other in the drift space due to the phenomenon of two-stream instability. As input and output device of two-stream amplifier can be used spiral segments, so the input and output devices will be short section of double-stream traveling wave tube. Two-stream amplifier, due to lack of slow-wave system is a promising tool for advancement in terahertz region.

The purpose of this work is to construct a theory of nonlinear nonstationary two-beam traveling wave tube with codirected beams. Currently, there are a lot of works about two-stream instability, much less work about a specific two-beam devices, none of them considers the time-dependent model.

The resulting system was solved numerically by the method of particles in cells. A comparison of the test results of the theory with nonlinear equations of two-stream amplifier that showed the correctness of derived equations. The comparison operation TWT and two-stream amplifier in the non-stationary area of operating conditions and in the interference area. The comparison of two-stream amplifier in which the inlet and outlet sections of the device modeled TWT, with dual beam traveling wave tube of the same length.

Keywords: Two-stream instability, two-stream amplifier, two-stream traveling wave tube.

DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-5-62-71

Paper reference: Voloshchuk S.S. For nonlinear nonstationary theory of two-stream traveling-wave tube amplifier and two-stream amplifier: General equations and some results of calculation // *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2016. Vol. 24. Issue 6. P. 62–71.

References

1. *Lopuhin V.M., Roshal A.S.* Opposite directed beam amplifier // *Radiotekhnika i elektronika*. 1962. N4. P. 643. (In Russian).
2. *Filimonov G.F.* Nonlinear theory two-stream tube. P. I. Deriving and studying of equations // *Radiotekhnika i elektronika*. 1959. N3. P. 489 (In Russian).
3. *Filimonov G.F.* Nonlinear theory two-stream tube. P. II. Computing results // *Radio-tehnika i elektronika*. 1959. N5. P. 832 (In Russian).
4. *Voloshchuk S.S.* Nonlinear model of two electron beam and testing // *Applied nonlinear dynamics*, 2015. N3. P. 38 (In Russian).
5. *Shulga V.G., Bondarenko B.N.* Nonlinear theory of two-stream TWT. Basic equations // *Sb. «Radiotekhnika»*. Harkov: pub. HSU. 1970. N14. P. 12 (In Russian).
6. *Katc A.M., Ilina E.M., Mankin I.A.* Nonlinear effects in microwave O-type devices with long-term interaction. Moscow: «Sovetskoe radio», 1975 (In Russian).

7. *Vainshtein L.A., Solntsev V.A.* Lectures on Microwave Electronics. Moscow: «Sovetskoe radio», 1975 (In Russian).
8. *Trubetskov D.I., Khramov A.E.* Lectures on Microwave Electronics for Physicists. Vol. 1. Moscow: FIZMATLIT, 2003 (In Russian).
9. *Trubetskov D.I., Khramov A.E.* Lectures on Microwave Electronics for Physicists. Vol. 2. Moscow: FIZMATLIT, 2004 (In Russian).



Волощук Сергей Сергеевич – родился в Саратове (1990), окончил Саратовский государственный университет (2013). В настоящее время – аспирант факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Научные интересы – численные методы, многолучевые системы. Имеет две научные публикации в журнале «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика».

410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: ss.voloshchuk@gmail.com