

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОВЫВОДНОЙ ВЫХОДНОЙ СЕКЦИИ В АВТОФАЗНОЙ ЛБВ

В. Г. КРЫЖАНОВСКИЙ, Г. И. ЧУРЮМОВ

Рассмотрен режим работы выходной секции автофазной ЛБВ (АЛБВ) с распределенным выводом энергии при учете распространения двух волн. Проведены расчеты для «гладких» замедляющих систем и систем с учетом встречной волны. Проведены расчеты при различных коэффициентах вывода энергии на каждом участке выходной секции. Показано, что применение многовыводных выходных секций АЛБВ позволяет повысить коэффициент полезного действия (КПД) прибора при сохранении устойчивого режима с захватом сгустка.

Ключевые слова: автофазная лампа бегущей волны, многовыводная выходная секции, захват сгустка, КПД.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к автофазной лампе бегущей волны (АЛБВ) в первую очередь обусловлен ее потенциально высоким КПД, возможностью повысить выходную мощность прибора при использовании относительно низковольтных источников питания и расширением функциональных возможностей – работой в режиме обратного преобразования энергии высокочастотной волны в энергию постоянного тока [1–4].

Режим обратного преобразования заключается в подаче на вход автофазной (выходной) секции АЛБВ высокочастотного сигнала с мощностью, существенно превосходящей мощность электронного потока, и прикладывается тормозящее статическое электрическое поле, захваченный в потенциальную яму электронный поток тормозится в статическом поле, но продолжает движение в потенциальной яме ВЧ поля, При этом осуществляется преобразование энергии ВЧ волны в энергию постоянного тока, аналогично процессу рекуперации энергии в много секционных коллаторах [4].

Улучшить процесс обратного преобразования можно с использованием многовыводной автофазной секции, когда осуществляется распределенный ввод ВЧ энергии и режим с захватом сгустка поддерживается на большой длине взаимодействия [5, 6]. Для АЛБВ распределенный вывод энергии предложен в [7]. Несколько выводов энергии в мощных СВЧ приборах используются для других целей – формирование в выходном резонаторе бегущей волны [8], стабилизации частоты и расширения функциональных возможностей прибора [9, 10]. При этом используется два вывода, с равной мощностью, но разными фазами.

Физические процессы в автофазной ЛБВ, обуславливают как высокие значения предельных уровней выходной мощности и КПД, так и их ограничение. К числу факторов, снижающих эффективность АЛБВ, относятся: большой уровень высокочастотной мощности в замедляющей системе, способствующий расфокусировке электронного пучка; активные потери в замедляющей системе; нарушение режима работы группирователя под действием встречной волны, передающейся из выходной секции; нарушение захвата сгустка под действие встречной волны в выходной секции [2, 4, 7, 11].

Непосредственно к рассматриваемым вопросам примыкает проблема осуществления обратного преобразования высокочастотной энергии в энергию постоянного тока или тока низкой частоты. Возможность осуществления реверсного режима (т.е. перехода из режима усиления в режим обратного преобразования изменением знака статического поля) наталкивается на противоречивые требования к группирователю автофазной ЛБВ. В реверсивном режиме на вход группирователя ранее рассмотренной схемы автофазной ЛБВ [4] должна поступать высокочастотная мощность с перепадом по величине на несколько порядков. Данное обстоятельство серьезно затрудняет получение оптимальных характеристик АЛБВ при работе в реверсивном режиме. В режиме обратного преобразования подача большой СВЧ мощности на вход группирователя возможна только при больших значениях скачка сопротивления связи, что вызывает сложности с осуществлением такого скачка между секциями ЛБВ.

Целью данной работы является рассмотрение схем построения АЛБВ с многовыводной замедляющей системой [7], в которых возможно ослабить влияние факторов, снижающих эффективность ее работы, и расширить ее функциональные возможности.

Дослідження виконано в рамках програми фундаментальних/прикладних досліджень Міністерства освіти і науки України, проект № 0118U003138

1. АЛБВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ВЫВОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МОЩНОСТИ

Увеличение длины участка взаимодействия с захваченным сгустком сопровождается, вследствие влияния активных потерь, гораздо более медленным ростом, а то и уменьшением КПД, при сохранении роста ВЧ мощности в замедляющей системе. Поэтому получение заданного значения выходной мощности автофазной ЛБВ при фиксированном значении I_0U_0 может сопровождаться снижением КПД. Большие значения ВЧ полей в пространстве взаимодействия ведут к расфокусировке электронного сгустка и его оседанию на стенки замедляющей системы. Кроме того, возникает опасность высокочастотного пробоя, особенно вблизи вывода энергии. С целью разрешения указанных противоречий между одновременным повышением выходной мощности и КПД, и придания АЛБВ дополнительных свойств регулируемого делителя ВЧ мощности и электронного фазовращателя было предложено [7] выполнять в выходной части автофазной ЛБВ несколько выводов высокочастотной мощности, расположенных последовательно вдоль замедляющей системы, рис. 1.

Работа устройства осуществляется следующим образом: поступающий во входную секцию электронный поток группируется в электронные сгустки и в момент около максимума высокочастотной мощности влетает в секцию с повышенным сопротивлением связи. Под действием резко возросшего высокочастотного поля электронный сгусток захватывается в потенциальную яму, в которой начинает совершать финитные колебания. Приложенное статическое электрическое поле смещает положение равновесия в тормозящий полупериод высокочастотного поля, обеспечивая передачу кинетической энергии электронного сгустка высокочастотной волне. Убыль кинетической энергии электронов компенсируется их ускорением в статическом электрическом поле. Таким образом, механизм энергообмена в АЛБВ приобретает черты класса М.

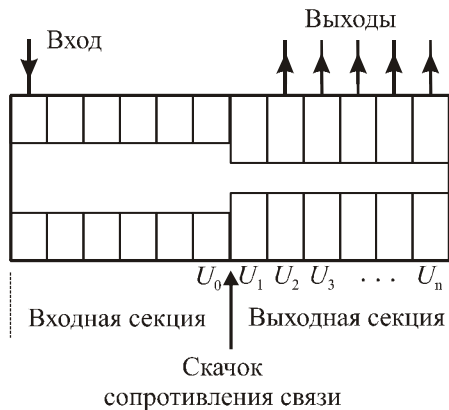


Рис. 1. Замедляющая система автофазной ЛБВ с множественными выводами СВЧ энергии

На рис. 2 показаны зависимости энергии высокочастотной волны и энергии электронов в подвижной системе координат, с точностью до константы относительно дна потенциальной ямы. Понятна идея изобретения [7] – выводить часть энергии на промежуточных выводах, снижая поток мощности в замедляющей системе АЛБВ до значения, которое выше уровня, обеспечивающего захват электронов, но при этом мощность поступает в нагрузку, а не распространяется в АЛБВ и ее часть не рассеивается в стенках замедляющей системы. Учитывая, что наиболее типичный режим роста энергии ВЧ волны – это линейный рост с расстоянием, а потери мощности в системе зависят квадратично от расстояния (1), то максимальный КПД падает с расстоянием.

Приращение энергии выбранного сечения электронного потока

$$W_e = Ne\Delta U = NeEx,$$

где N – количество электронов, e – заряд электрона, ΔU – разность потенциалов, E – напряженность электростатического поля, x – расстояние. Считая, что вся эта энергии перешла в высокочастотную энергию (за исключением небольшого увеличения колебательной и потенциальной энергии захваченных электронов) можно записать $W_{RF} = W_e$. Потери высокочастотной энергии на участке ЗС $dW_{diss} = kW_{RF}(x)dx$, k – коэффициент потерь ВЧ мощности на единицу длины, а на интервале Δx , будут равны

$$W_{diss} = \int_0^{\Delta x} kNeExdx = kNeE \frac{x^2}{2}. \quad (1)$$

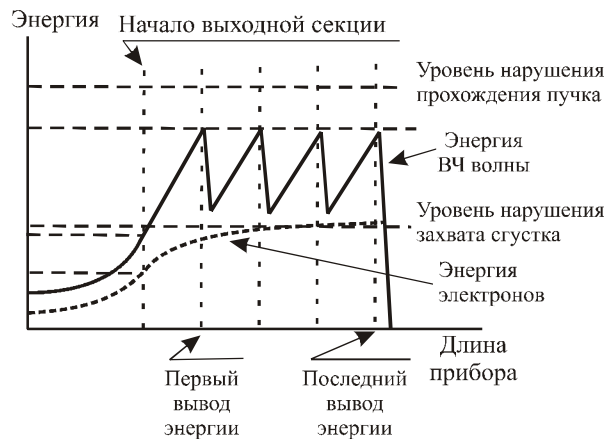


Рис. 2. Изменение ВЧ мощности и энергии электронов в подвижной системе координат вдоль системы с распределенным выводом энергии

КПД автофазной секции тогда

$$\eta_A(x) = \frac{W_e - W_{diss}}{W_e} = 1 - k \frac{x}{2}. \quad (2)$$

Если предположить, что как на рис. 2, выводим 4 раза одинаковую мощность, то КПД автофазной секции в случае отсутствия выводов будет $\eta_A = 1 - 2k\Delta x$, а при наличии выводов $\eta_A = 1 - 0,5k\Delta x$, т.е. падение КПД в 4 раза меньше и суммарная выходная мощность больше.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МНГОВЫВОДНОЙ ВЫХОДНОЙ СЕКЦИИ АЛБВ

В настоящее время для изучения физических процессов в ЛБВ используются не только мощные дву- или трехмерные программы моделирования, но и более простые методы и программы, даже созданные в пакете MathCAD [12, 13]. Часть моделирования АЛБВ с многывыводной выходной секцией проводилось по программе, описанной в [11, 14], а также с помощью программы по упрощенному подходу с одной волной, написанной на языке Паскаль. Такое рассмотрение позволяет проанализировать идеализированный режим работы АЛБВ с учетом только одной синхронной волны.

Для моделирования использовались уравнения нелинейной теории ЛБВ в записи [4, 13]. Система уравнений записывается для одномерной модели электрон-дисков и состоит из уравнений движения

$$\frac{dv_j}{d\zeta} = (1 + \varepsilon v_j)^3 \left[\operatorname{Re} \left(F e^{-iu_j} \right) + F_{st} + F_q \right], \quad (3)$$

$$\frac{du_j}{d\zeta} = v_j, \quad (4)$$

уравнения возбуждения

$$\frac{dF}{d\zeta} - j\xi F = -\chi I_1, \quad (5)$$

уравнений для гармоник тока и поля пространственного заряда

$$I_k = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N e^{iku_j}, \quad (6)$$

$$F_q = q \operatorname{Im} \sum_{k=1}^{N_p} \frac{\Gamma_k}{k} I_k e^{-iku_j}. \quad (7)$$

В уравнениях: ζ – безразмерная координата, ε – параметр нормировки, u_j – фаза j – электрона, $\xi = \xi' + i\xi''$ – параметры расстройки скоростей и параметр потерь, χ – параметр эффективности взаимодействия (пропорционален сопротивлению связи), N – количество электронов, N_p – число гармоник тока при расчете поля пространственного заряда, Γ_k – коэффициент депрессии на частоте $k\omega$.

Расчет проводится по секциям, в первой секции на вход поступает немодулированный электронный поток, в каждой последующей начальными условиями

являются состояние потока и волны на выходе предыдущей секции. Скачок сопротивления связи моделируется изменением χ . Волновой КПД

$$\text{рассчитывается по формуле } \eta = \frac{\varepsilon}{2} \left(\frac{|F(\zeta)|^2}{\chi(\zeta)} - \frac{|F(0)|^2}{\chi(0)} \right) \times \left(1 + 2\varepsilon \int_0^\zeta F_{cm} d\tilde{\zeta} \right)^{-1}.$$

При расчете КПД АЛБВ с выво-

дами энергии, энергия, выведенная на каждом выводе, добавляется в полезную энергию.

Зависимости мощности волны и полного КПД в системе без выводов энергии и в системе с выводами показаны на рис. 3 и 4. P и η относятся к системе без выводов, P_1 и η_1 – к системе с промежуточными выводами энергии. Видно, что нормированная мощность на выводе системы без выводов больше, но если учесть мощность на промежуточных выводах, где выводилось по 20% энергии, проходящей по данному сечению, то суммарная мощность будет больше. Это

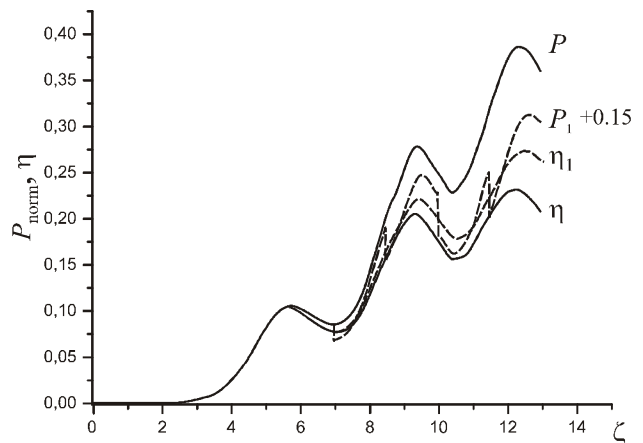


Рис. 3. Зависимости выходной мощности и КПД АЛБВ при наличии выводов энергии, промежуточные выводы отводят 20% мощности, проходящей в данном сечении, 0,15 – мощность, выводимая через промежуточные выводы

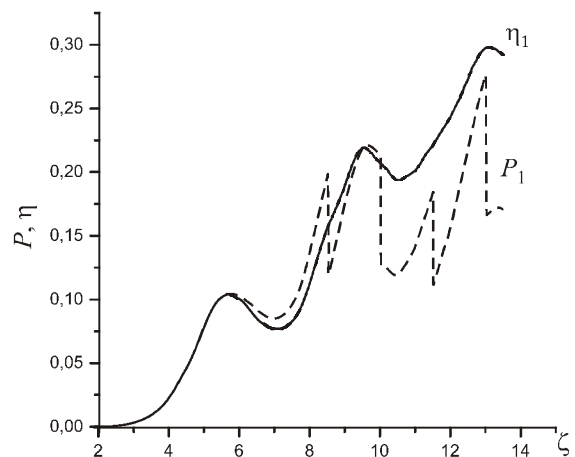


Рис. 4. Зависимости выходной мощности и КПД АЛБВ при выводе 40% мощности через промежуточные выводы

показывает и полный КПД системы с выводами η_1 , который выше, чем КПД АЛБВ без выводов энергии. Параметр потерь в этом примере равен $\xi'' = 0.1$.

В таблице представлены нормированные мощности и фазы сигналов относительно входного сигнала для выводов при различных коэффициентах ответвления (первая колонка), для значения 0.4 расположение выводов соответствует рис. 4. Видно, что при удалении от начала секции наблюдается большая равномерность выходной мощности и фазового сдвига между выводами. Это связано с «хаотизацией» захваченного сгустка, рис. 5. На этом рисунке показаны довольно типичные траектории электронов относительно поля реальной волны, которые демонстрируют захват электронов в поле бегущей волны, но в отличие от обычных режимов, где незахваченные электроны появляются в начале автофазной секции, тут электрон покидает область финитного движения позже, после вывода части ВЧ мощности из пространства взаимодействия.

Таблица 1

	Вывод	1	2	3	4
0,2	Мощность	0,017	0,038	0,046	0,050
	Фаза, рад	-1,92	-2,37	-2,49	-2,68
0,3	Мощность	0,026	0,056	0,065	0,065
	Фаза, рад	-1,92	-2,4	-2,56	-2,84
0.4	Мощность	0,08	0,086	0,074	0,111
	Фаза, рад	-2,32	-2,5	-2,80	-2,87

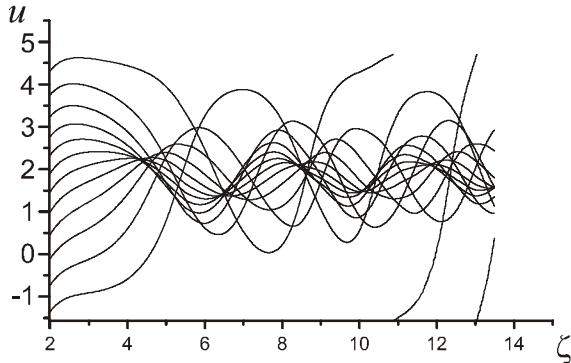


Рис. 5. Фазовые траектории электронов в многовыводной АЛБВ для условий рис. 4

Расчеты многовыводной выходной секции проводились и по программе с учетом встречной волны [11, 14]. Для моделирования промежуточного вывода энергии в вычислительной программе [11, 14] используется задание коротких промежуточных секций, в которых производится пересчет амплитуды высокочастотного поля на заданную величину. Разность ВЧ мощности до и после этой секции и является мощностью, выведенной промежуточным выводом. При расчете КПД в последующих секциях, выведенная ВЧ энергия учитывается в составе полезной энергии. Таким образом, в связи с уменьшением потерь мощности в стенках замедляющей системы повышается общий КПД усилителя. На рис. 6 показаны зависимости КПД при моделировании выводов энергии в сравне-

нии со случаем однородной системы. Активные потери учитываются в обоих случаях. Видно, что вследствие уменьшения ВЧ мощности, рассеиваемой на активном сопротивлении в замедляющей системе, возрастает КПД усилителя с промежуточными выводами энергии.

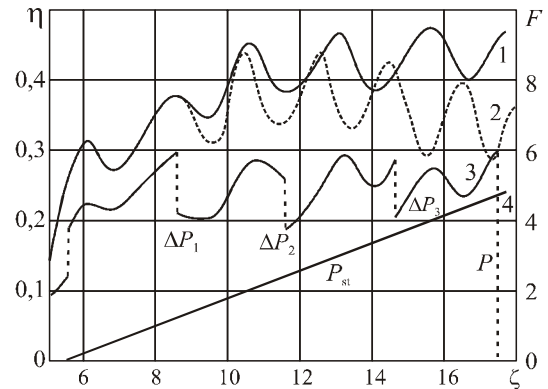


Рис. 6. 1 – КПД АЛБВ при наличии выводов энергии, 2 – КПД без выводов энергии в выходной секции, 3 – безразмерная амплитуда волны в канале взаимодействия, скачки поля обусловлены: первый скачком сопротивления связи, остальные – выводом части энергии из системы, 4 – нормированная энергия, которую электроны получают в статическом поле

На практике желательно иметь равные уровни ВЧ мощности на выводах. Это условие накладывает связь на коэффициент отвода мощности каждого вывода и на расстояние между ними. При этом слабая связь вывода с замедляющей системой и малый коэффициент ответвления мощности при малом расстоянии между выводами предпочтительны с точки зрения обеспечения однородности системы. Но при этом, вследствие пульсации ВЧ мощности, ее величина на каждом выводе будет отличаться от мощности на соседних выводах. При большом расстоянии между выводами появляется возможность управления уровнем отведенной мощности путем изменения уровня статического электрического поля на участке между выводами. В этом случае встает вопрос об оптимальном уровне мощности, отводимой промежуточным выводом. Очевидно, что при этом не должен нарушаться захват электронов. Явление нарушения захвата электронов ограничивает сверху величину отводимой высокочастотной мощности.

На рис. 2 показана схема расположения выводов энергии при организации распределенного съема ВЧ мощности. Исходя из приведенных соображений и расчетов по одномерной нелинейной теории можно сформулировать следующие оптимальные условия распределенного отвода ВЧ мощности: вывод мощности проводится до некоторого одинакового уровня, выводы расположены эквидистантно и отводят одинаковую мощность; приращение ВЧ мощности в замедляющей системе на участке между выводами ле-

жит в пределах 1 – 3 дБ. При этом будет достигаться оптимальное соотношение между повышением КПД и возможностью получения одинаковых значений отводимой мощности. Выравнивание мощности производится изменением разности потенциалов на участке между выводами. Применение выводов энергии, работающих на излучатели, облегчает решение проблемы их гальванической развязки.

Сдвиг фаз между выходными сигналами происходит при одновременном изменении характеристик электронного пучка: тока и ускоряющего напряжения, при этом высокочастотная мощность, отводимая каждым выводом, будет оставаться неизменной.

Промежуточные выводы энергии вместе с мощностью прямой волны будут отводить и мощность встречной волны, улучшая тем самым взаимодействие на прямой волне. Уменьшается мощность встречной волны, попадающая в группирователь. В тех случаях, когда в выходных сигналах нежелательно иметь сигнал встречной волны с отличающейся фазой, выводы мощности выполняются по типу направленного ответвителя, для этого выводы располагаются группами, например, по два, и выводы соединяются линией с определенной электрической длиной, чтобы обеспечить эффект направленной передачи мощности. В качестве такой линии предпочтительно использовать отрезок замедляющей системы с такой же или близкой дисперсией.

В случае применения резонаторных замедляющих систем с целью облегчения согласования выводов с замедляющей системой (повышения регулярности системы) выводы мощности целесообразно выполнять в каждом резонаторе замедляющей системы. При этом через каждый вывод будет проходить некоторая мощность, приблизительно равная усредненному приращению ВЧ мощности на одном периоде замедляющей системы. Однако в этом случае будет иметь место существенная неравномерность выводимой энергии. Исходя из изложенного, расстояние между выводами следует полагать равным расстоянию между первым выводом и началом выходного участка, в безразмерных единицах это расстояние при максимуме КПД находится в пределах $0,5 < \Delta\zeta \leq 3$. В целом схема построения автофазной ЛБВ с распределенным выводом энергии позволяет повысить КПД и расширить ее функциональные возможности. В случае работы данного устройства в режиме обратного преобразования [4], энергии высокочастотного поля в энергию постоянного тока выводы энергии могут служить для распределенного ввода ВЧ энергии. При этом напряженность ВЧ поля в замедляющей системе будет поддерживаться вблизи оптимального уровня. Выполнение выводов энергии по типу направленных ответвителей в данном случае особенно целесообразно, поскольку позволяет подпитывать преимущественно прямую волну, энергия которой преобразуется в постоянный ток.

ВЫВОДЫ

Численным моделированием подтверждена устойчивость режима работы автофазной ЛБВ с множественным выводом мощности ВЧ волны в выходной секции прибора.

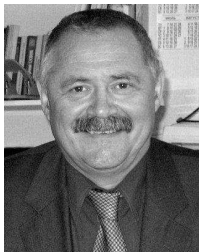
Литература

- [1] *Белявский Е. Д.* О режиме работы приборов О-типа с захватом электронных пучков полем электромагнитной волны // Радиотехника и электроника, 1971, т. 16, №1, с. 208–210.
- [2] *Крыжановский В. Г., Бондаренко Б. Н.*, Расчет выходных параметров автофазной ЛБВ. Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. –1990. – В.9. – С. 3–6.
- [3] *Белявский Е. Д.* Автофазный лазер на свободных электронах/ Е.Д. Белявский, О.В. Теличкина // Техника и приборы СВЧ, 2011, №2, с. 7–10
- [4] *Бондаренко Б. Н., Крыжановский В. Г.* Реализация режима обратного преобразования в автофазной ЛБВ // Радиотехника. Республ. межвед. н.-т. сб. Харьков, Вып. 57. 1981. – С. 114–118.
- [5] *Бондаренко Б. Н., Воротынцева И. И.* Автофазный СВЧ-конвертор с многократным вводом энергии // Радиотехника. Харьков: Вища школа, 1990. Вып. 95. С. 29–35.
- [6] *Vorotyntseva Irina, Martsenyuk Nataliya*, Autophase microwave-converto with multiple energy input // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, 2016, No. 3–4, p. 109–111.
- [7] *Бондаренко Б. Н., Крыжановский В. Г.* Усилитель бегущей волны О-типа. Авт. свид. СССР, № 1 153 747. Заявлено 5.12.83.
- [8] *Будкер Г. И.* и др. Гирокон – высокоэффективный преобразователь мощного релятивистского пучка для СВЧ-питания ускорителей заряженных частиц. // Атомная энергия, т.44, вып. 5, май 1978. С. 397–403.
- [9] *Чурюмов Г. И., Эжзли А. И., Басрави К. М., Исаева Е. Б.* Математическое моделирование перестройки частоты в магнетроне с двумя выводами энергии. (Метод эквивалентных схем) // Прикладная радиоэлектроника, 2014, Том 13, № 1. С. 51–57.
- [10] *Винтизенко И. И., Новиков С. С.* Релятивистские магнетронные СВЧ генераторы с внешней связью резонаторов // Журнал технической физики, 2010, том 80, вып. 11. С. 95–104.
- [11] *Крыжановский В. Г., Чурюмов Г. И.* Учет отражений электромагнитной волны от места скачка сопротивления связи в автофазной ЛБВ // Прикладная радиоэлектроника, 2016, Том 15, №4. – С. 334–341.
- [12] *Саурова Т. А.* Методика оценки в безразмерных параметрах характеристик эффективности автофазной многолучевой ЛБВ с переменной фазовой скоростью. // ElectronCommn. 2017, vol. 22, №2, p.16–19.
- [13] *Друк В. А., Назарова М. В., Солнцев В. А.* Исследование нелинейных характеристик спиральных ЛБВ на основе интегрированных математических пакетов // В книге «Юбилейная 60-я Научная сессия, посвященная Дню радио», 17-19 мая 2005 г. СПб.: ЛЭТИ, 2005. С. 160–162.
- [14] *Осин А. В., Солнцев В. А.* Программа для расчета взаимодействия в приборах типа О с периодической структурой. // Электронная техника. Сер.1, Электроника СВЧ, 1980, № 9, с. 69.

Поступила в редколлегию 25.09.2018



Крыжановский Владимир Григорьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиофизики и кибербезопасности Донецкого национального университета МОН Украины. Область научных интересов – электроника и электродинамика СВЧ.



Чурюмов Геннадий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники, профессор Харбинского политехнического университета (г. Харбин, КНР), IEEE Senior Member, European Microwave Association Member. Область научных интересов – СВЧ техника и электроника, применение микроволновых технологий, 2-D и 3-D математическое моделирование электронно-волновых процессов; электромагнитная совместимость.

УДК 621.385.6

Крижановський В. Г. Використання багатовивідної вихідної секції у автофазній ЛБВ / В. Г. Крижановський, Г. І. Чурюмов // Прикладна радіоелектроніка: наук. – техн. журнал. – 2019. – Том 18, № 1, 2. – С. 34 – 39.

Розглянуто роботу автофазної ЛБВ (АЛБВ) з розподіленим виводом потужності у наближенні «гладких» сповільнюючих систем та систем з урахуванням зустрічної хвилі. Виконано розрахунки при різних коефіцієнтах відведення потужності на кожній ділянці вихідної секції. Підтверджено, що використання багатовивідних вихідних секцій АЛБВ дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії пристрою при збереженні стійкості режиму з захопленням електронного згустку.

Ключові слова: автофазна лампа біжучої хвилі, багатовивідна вихідна секція, захоплення згустку, ККД.

Табл.: 01. Іл.: 06. Бібліогр.: 14 найм.

UDC 621.385.6

Krizhanovski V. G. Using a multi-output section in an autophase TWT / V. G. Krizhanovski, G. I. Churyumov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2019. – Vol. 18. № 1, 2. – P. 34–39.

The article deals with the work of an auto-phase TWT (ATWT) with distributed energy output in the approximation of "smooth" slowing systems and systems with an allowance for the counter-propagating wave. There are calculations carried out for different energy output coefficients at each part of the output section. The use of multi-output sections of ATWT is shown to allow increasing the efficiency of the device while maintaining a stable regime with bunch capturing.

Keywords: auto-phase traveling wave lamp, multi-output output section, bunch capture, efficiency.

Tab. 01. Fig. 06. Ref.: 14 items.