

УДК 621.385

**ЛБВ-О С ОПТИМАЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОПОР**

А.А. КУРАЕВ, А.А. НАВРОЦКИЙ, А.К. СИНИЦЫН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 28 июня 2010*

Предложена спиральная ЛБВ, в которой используются закрепляющие спираль диэлектрические стержни из материала, диэлектрическая проницаемость или поперечное сечение которого изменяются вдоль области взаимодействия заданным образом, обеспечивая требуемый плавный закон изменения замедления и повышение КПД.

*Ключевые слова:* Лампа Бегущей Волны (ЛБВ), спиральная Замедляющая Система (ЗС), КПД.

**Введение**

Как показывают расчеты, в спиральной ЛБВ с плавным законом изменения замедления вдоль области взаимодействия имеется возможность достичь значений электронного КПД 70-80% [1]. Однако, такие лампы до сих пор не нашли широкого распространения ввиду трудностей, связанных с технологией изготовления спиральной замедляющей системы с плавным нерегулярным шагом навивки. Ранее, для реализации плавного закона изменения замедления в спирали с регулярным шагом, была предложена ЛБВ с авторегулировкой замедления за счет использования поддерживающих спираль опор из гипотетического диэлектрика, проницаемость которого возрастает при повышении амплитуды ВЧ-поля, что приводит к увеличению замедления [2]. Существование такого диэлектрика и возможность создания ЛБВ с авторегулировкой замедления на сегодняшний день проблематичны. Однако, на основе эффекта авторегулировки замедления [2], в [3] предложен метод нахождения оптимального закона изменения замедления вдоль области взаимодействия, который используется в данной статье.

В настоящей статье предложена замедляющая система (ЗС) с поддерживающими стержнями, диэлектрическая проницаемость которых изменяется вдоль оси  $z$  по заданному закону, тем самым обеспечивая плавное изменение замедления при регулярной навивке спирали. Необходимый профиль фазовой скорости можно обеспечить либо плавно изменяя диэлектрическую проницаемость материала опор, либо изменяя форму опор при постоянном значении их диэлектрической проницаемости. При этом использовалась методика расчета дисперсионных характеристик, описанная в [4], позволяющая получить зависимость замедления  $\beta_{\phi}^{-1}(\epsilon)$  и сопротивления связи  $R_s(\epsilon)$  от величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , а также зависимость замедления  $\beta_{\phi}^{-1}(\phi)$  и сопротивления связи  $R_s(\phi)$  от азимутального угла  $\phi$  опор секторного типа.

**Конструкция двухсекционной ЛБВ**

На рис. 1. показано продольное сечение, а на рис. 2 два варианта поперечного сечения ЗС предлагаемой двухсекционной ЛБВ: 1 – электронно-оптическая система; 2 – входной волновод, согласованный с антенкой спирали; 3; 4 – спиральная ЗС первой секции; 5 – однородные диэлектрические опоры спирали; 6 – аттенюатор; 7 – спиральная ЗС второй секции ЛБВ; 8 –

нерегулярная диэлектрическая опора спирали выходной секции; 9 – магниты фокусирующей системы; 10 – выходной волновод, согласованный с антенной 11 выходной секции; 12 – коллектор электронов; 13 – диэлектрические шайбы, изоляторы; 14 – экран спиральной ЗС; 15 – диафрагмы входного и выходного волноводов.

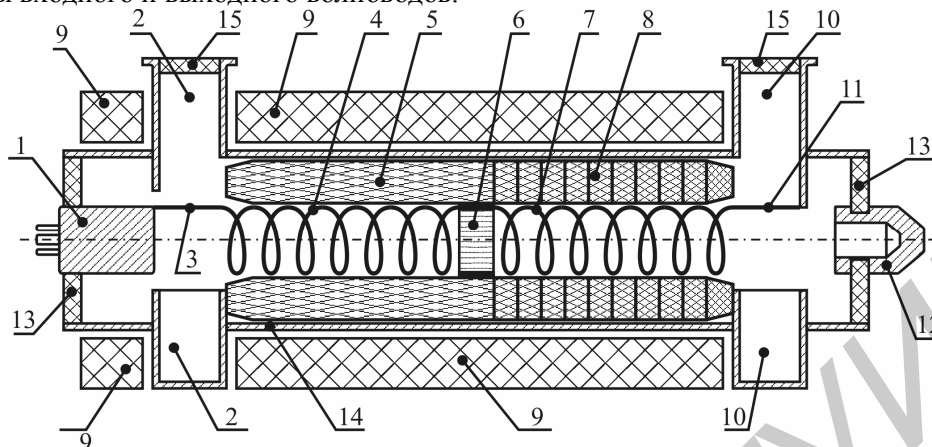


Рис. 1. Схема усилительной двухсекционной ЛБВ-О с одноступенчатым рекуператором

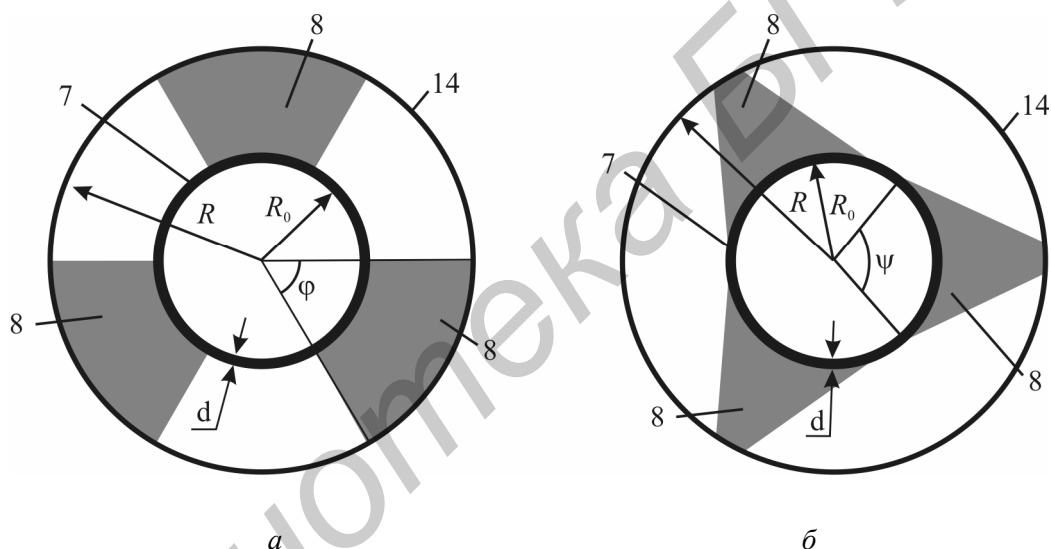


Рис. 2. Поперечное сечение ЗС: опоры секторного типа (а), опоры обратного секторного типа (б)

### Методика расчета ЛБВ с профилированием характеристик диэлектрических опор

Как показали результаты исследования, выполненного с использованием метода расчета дисперсионных характеристик [4] для рассматриваемой ЗС, замедление фазовой скорости возрастает как с увеличением диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , так и площади поперечного сечения, при этом величина замедления зависит от формы диэлектрических опор. Поэтому для реализации плавного закона изменения фазовой скорости вдоль области взаимодействия ЛБВ можно изменять как величину диэлектрической проницаемости, так и азимутальный размер  $\varphi$  или  $\psi$  поддерживающих опор. Так, например, угол  $\varphi$  или  $\psi$  (рис. 2) может изменяться от 0 (нет диэлектрических опор) до  $2\pi/3$  (максимальное заполнение).

Для проверки возможности повышения КПД за счет плавного изменения свойств диэлектрических опор вдоль лампы были выполнены расчеты двухсекционной ЛБВ с диэлектрической корректировкой замедления во второй секции; в первой секции свойства опор не меняются. Шаг спирали в первой и во второй секциях – постоянный. Были выбраны следующие параметры спирали и экрана:  $R_0 = 0,15$  см,  $R = 0,35$  см, диаметр провода спирали  $d = 0,1$  см, шаг спирали  $h = 0,24$  см, длина волны  $\lambda = 6$  см, относительная средняя скорость электронов

$\beta_0 = v_0/c = 0,17$  ( $V_0 = 7,5$  кВ). При расчетах использовалась одномерная модель ЛБВ с нерегулярной ЗС, описанная в работе [1], в которой необходимо задавать зависимость сопротивления связи  $R_s$  от частоты и фазовой скорости  $\beta_\phi$  в заданном сечении  $z$  области взаимодействия электронного пучка с усиливаемой замедленной волной, имеющей амплитуду  $A(z)$ . Эти зависимости для выбранной здесь ЗС с диэлектрическими опорами рассчитывались по методике, описанной в [4].

На рис. 3 представлены характерные зависимости замедления и сопротивления связи от диэлектрической проницаемости, формы и азимутального размера опор выбранного размера спиральной ЗС. В частности видно, что наибольшее изменение фазовой скорости можно получить с опорами, имеющими большую диэлектрическую проницаемость при изменении угла в диапазоне  $0 < \varphi < 1$ .

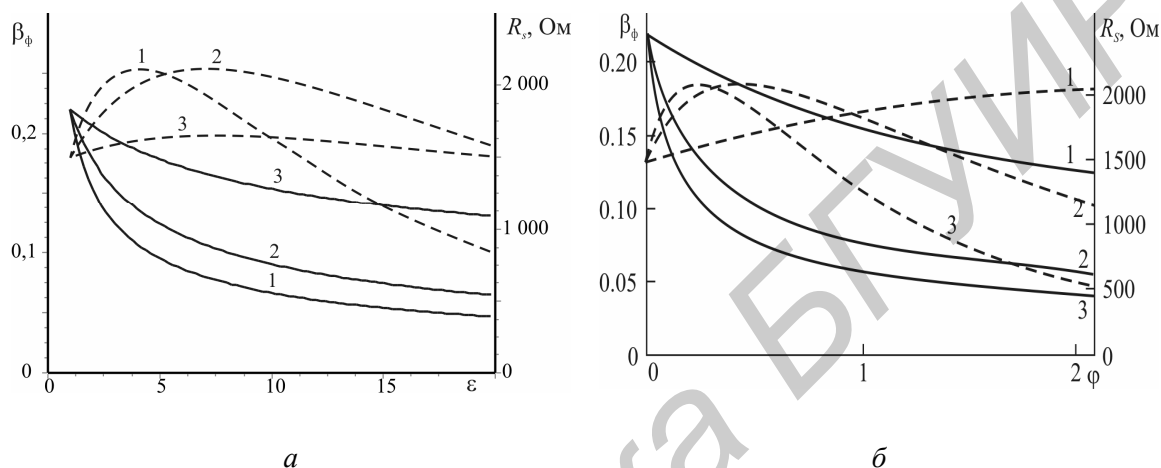


Рис.3. Зависимость фазовой скорости (сплошная) и сопротивления связи (пунктир) от характеристик опор; *а*: 1 – все пространство между спиралью и экраном заполнено диэлектриком, 2 – три опоры секторного типа (для каждой опоры  $\Delta\varphi = \pi/3$ ), 3 – три опоры кругового сечения; *б*: три опоры секторного типа (для каждой опоры  $\Delta\varphi = \pi/3$ ) 1 –  $\varepsilon = 3$ , 2 –  $\varepsilon = 15$ , 1 –  $\varepsilon = 27$

Из рис. 3 видно, что зависимость  $\beta_\phi$  от  $\varepsilon$  (или от  $\varphi$  или  $\psi$ ) имеет характерный экспоненциальный вид и хорошо аппроксимируется формулой (здесь  $u \equiv \{\varepsilon$  или  $\varphi$  или  $\psi\}$ )

$$\beta_\phi(u) \approx \beta_{\phi 0} \left( e^{-c_1 u} + c_2 \right) / \left( e^{-2c_1} + c_2 \right). \quad (1)$$

Например, для кривой 2 рис. 3, *а* коэффициенты  $c_1 = 0,15$ ,  $c_2 = 0,37$ ,  $\beta_{\phi 0} = 0,21$ ,  $u = \varepsilon \geq 2$ .

Необходимые для расчетов зависимости сопротивления связи от фазовой скорости и частоты восстанавливались по интерполяционным формулам из заранее рассчитанных таблиц.

Для расчета оптимального закона изменения диэлектрической проницаемости (азимутального размера  $\varphi$  или  $\psi$ ) в выходной секции воспользуемся методом авторегулировки замедления [3] с законом зависимости фазовой скорости  $\beta_\phi$  от амплитуды усиливаемой волны  $A(z)$ , получаемым из (1):

$$\beta_\phi(A^2) \approx \beta_{\phi 0} \cdot \left( e^{-c_1(u_0 + \alpha A^2)} + c_2 \right) / \left( e^{-2c_1} + c_2 \right), \quad (2)$$

в котором параметры  $u_0$  и  $\alpha$  находились из условия максимума электронного КПД лампы и в результате получался искомый закон  $u(z) = u_0 + \alpha A(z)^2$ .

Ниже приведены параметры и характеристики двух типичных оптимизированных вариантов ЛБВ.

### ЛБВ с изменением диэлектрической проницаемости опор секторного типа вдоль выходной секции

В первой секции (до поглотителя) – задавалось  $\varepsilon = \text{const}$ , а во второй секции использовались диэлектрические опоры, имеющие плавно изменяющуюся вдоль области взаимодействия диэлектрическую проницаемость стержней по закону  $\varepsilon(z)$ . Предварительно были получены зависимости  $\varepsilon(\beta_\phi)$  и  $R_s(\beta_\phi)$  – (рис. 4), которые непосредственно входят в математическую модель [1]. Как видно из рис. 4, для уменьшения фазовой скорости волны требуется увеличивать диэлектрическую проницаемость опор. Сопротивление связи при этом тоже увеличивается, что благоприятно для работы ЛБВ с плавным увеличением замедления к концу второй секции.

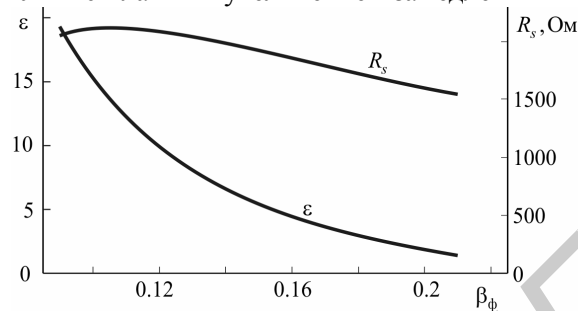


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости и сопротивления связи от фазовой скорости для ЗС с тремя опорами секторного типа при  $\phi = \pi/3$

В результате оптимизации получены:  $\alpha = 0,94$ ,  $\varepsilon_0 = 2,1$ , электронный КПД – 58%, ток пучка  $I_0 = 0,41$  А, длина спирали  $L = 12,4$  см, коэффициент усиления  $K_y = 30,2$  Дб; поглотитель расположен на участке  $0,4 < z/L < 0,5$ .

На рис. 5 приведены: закон изменения  $\varepsilon(z)$ , функции группировки  $Gr$  [1, 2] и электронного КПД  $\eta$  вдоль ЗС. Закон изменения  $\varepsilon(z)$  в опорных стержнях может быть технически реализован либо путем переменного легирования стекла стержней (при этом возможна вариация  $\varepsilon$  в пределах 2...15), либо набором секций с различным  $\varepsilon$ .

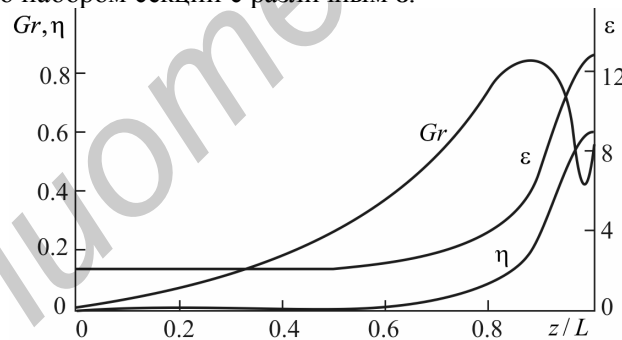


Рис. 5. Распределение  $\varepsilon$ ,  $Gr$  и  $\eta_e$  вдоль области взаимодействия

Распределение электронов по скоростям на выходе ЗС позволяет при одноступенчатой рекуперации вернуть в источник питания 10% энергии и получить технический КПД с учетом рекуперации – 68% [5].

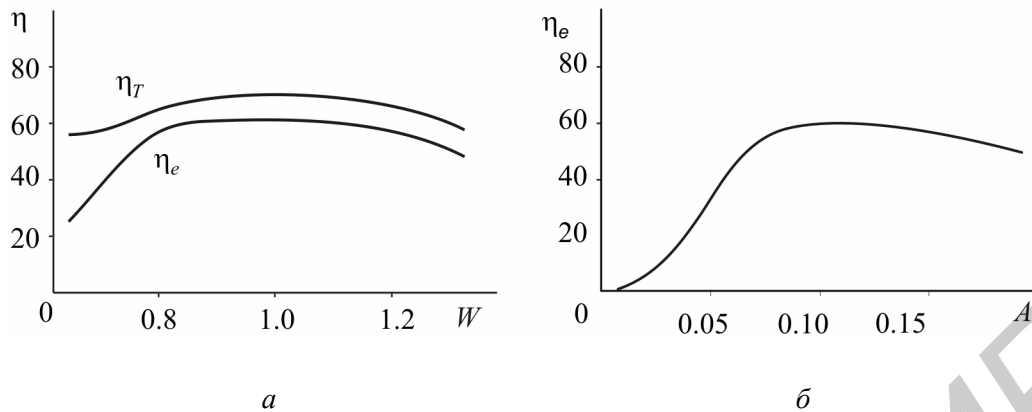


Рис. 6. Частотная (а) и амплитудная (б) характеристики полученного варианта

### ЛБВ с изменением азимутального размера диэлектрических опор обратного секторного типа вдоль выходной секции

Первая секция: регулярная  $\epsilon = \text{const}$  (форма стержней постоянная), во второй секции замедляющее свойство стержней регулируется с помощью плавного изменения их азимутального размера  $\psi$ . Проведенные исследования показали, что наибольшее влияние на фазовую скорость и сопротивление связи оказывает диэлектрик вблизи спирали ЗС. При использовании формы опор секториального типа (рис. 2,а) при увеличении угла  $\phi$  с уменьшением  $\beta_\phi$  одновременно уменьшается и сопротивление связи (рис. 3). Поэтому в рассматриваемом варианте 2 были предложены опоры обратного секторного типа с уменьшающимся по радиусу заполнением области (рис. 2,б).

Для предложенной на рис. 2, б формы диэлектрических опор были получены распределения  $\psi(\beta_\phi)$  и  $R_S(\beta_\phi)$  (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что для уменьшения фазовой скорости волны требуется делать опоры с большим азимутальным размером. Сопротивление связи при этом тоже возрастает, что способствует улучшению взаимодействия электронов с полем усиливаемого сигнала.

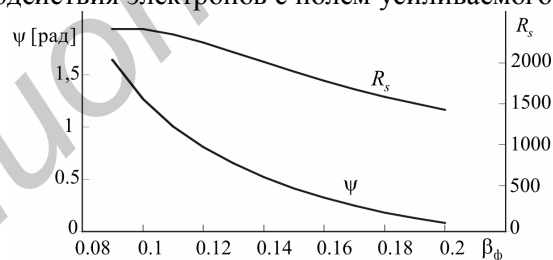


Рис. 7. Зависимость угла  $\psi$ , характеризующего форму опор и сопротивления связи  $R_S$  от фазовой скорости для ЗС с тремя опорами при  $\epsilon=15$

В результате оптимизации получен электронный КПД  $\eta_e = 52\%$ ,  $I_0 = 0,12$  А, длина спирали  $L = 22,7$  см,  $K_y = 32,1$  Дб. Поглотитель расположен на участке  $0,5 < z/L < 0,6$ .

На рис. 8 представлено изменение характеристик взаимодействия  $\eta_e$ ,  $Gr$  и угла  $\psi$  вдоль ЛБВ. Как видно из графика, для получения оптимальных условий для отбора энергии во второй секции размер диэлектрических опор должен монотонно увеличиваться.

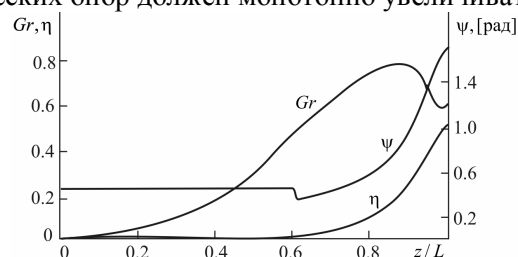


Рис. 8. Распределение  $\psi$ ,  $G_r$  и  $\eta_e$  вдоль области взаимодействия для варианта 2

Распределение электронов в ЭП по энергиям на выходе из ЗС в этом варианте позволяет при одноступенчатой рекуперации вернуть в источник питания 20% энергии и получить технический КПД 72%.

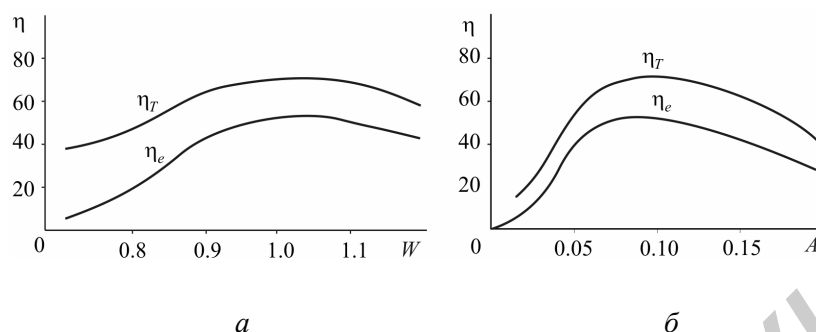


Рис. 9. Частотная (а) и амплитудная (б) характеристики полученного варианта

Полученный прибор имеет несколько меньшую полосу усиления, чем в варианте ЛБВ с изменением диэлектрической проницаемости опор.

### Заключение

Следует отметить, что в предложенных вариантах ЛБВ плавный закон изменения фазовой скорости реализуется при регулярной навивке спирали, в результате снимаются многие проблемы при изготовлении оптимизированных по КПД ЛБВ-О с переменным вдоль оси замедлением.

## THE TWOSTAGE TWT WITH DIELECTRICS CORRECTIVE OF THE SLOWING

A.A. KURAYEV, A.A. NAVROTSKY, A.K. SINITSYN

### Abstract

The helix TWT in which the dielectrics supports with varying along area of interaction  $\epsilon$  are used is suggested. The law of varying  $\epsilon$  have maintained the necessary for high efficiency distribution of slowing of helix with constant pitch.

### Литература

1. Кураев А.А., Синицын А.К. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 1. С. 61–71.
2. Кураев А.А., Навроцкий А.А., Попкова Т.Л. и др. // ЭВиЭС. 1998. Т.3, № 4. С. 47–50.
3. Кураев А.А., Навроцкий А.А., Синицын А.К. // Материалы 19-й Международной Крымской Конференции (КрыМиКо 2009). 2009. С. 163–164.
4. Синицын А.К., Навроцкий А.А. // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 11.
5. Кураев А.А., Навроцкий А.А., Синицын А.К. // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50, № 10. С. 1243–1248.