

УДК 621.385.632

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕРЕГУЛЯРНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ О-ТИПА С УЧЕТОМ РАССЛОЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ

И.Н. Цырельчук, Д.Н. Михайловский, В.Б. Булычёва

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

IRREGULAR TRAVELLING WAVE TUBES OPTIMIZATION BASED ON BUNDLE AND VELOCITY DISPERSION IN ELECTRON BEAM

I.N. Tsyrelchuk, D.N. Mikhailovsky, V.B. Bulycheva

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

Выполнены расчеты неоднородной релятивистской лампы бегущей волны О-типа с замедляющей системой типа круглого гребенчатого волновода с плавно изменяющейся глубиной канавки.

Ключевые слова: лампа бегущей волны О-типа (ЛБВ-О), замедляющая система, СВЧ, оптимизация, коэффициент полезного действия (КПД).

The calculations of the inhomogeneous relativistic traveling-wave tube with O-type slow-wave system such as a circular waveguide with a comb smoothly varying depth grooves were performed.

Keywords: traveling wave tube (TWT), slow-wave structure, microwave, optimization, efficiency.

Введение

Использование метода синхронного электрона позволяет достаточно просто найти близкий к оптимальному закон изменения замедления волны в нерегулярной лампе бегущей волны О-типа (ЛБВ-О) [1]–[3]. Однако, применяя этот метод для оптимизации по КПД релятивистской нерегулярной ЛБВ-О, необходимо учитывать факторы, существенные для высокоточных релятивистских устройств такого типа: конечную толщину пучка, определяющую его динамическое расслоение и распределение статических скоростей электронов по толщине, связанное с уменьшением потенциала по сечению пучка.

В статье используется модель ЛБВ-О с замедляющей системой (ЗС) типа круглого гребенчатого волновода с плавно изменяющейся глубиной канавки. В такой системе радиальная зависимость сопротивления связи и осевой составляющей напряжённости электрического поля волны оказываются функциями продольной координаты как дополнительного фактора, обуславливающего различие условий взаимодействия разных слоёв пучка. Предполагается, что диаметр поперечного сечения электронного пучка трубчатой формы намного превосходит его толщину, так что можно использовать квазиплоское приближение при вычислении сил пространственного заряда. Принимается также широко используемое одномерное по слоям пучка приближение, т. е. поперечное движение электронов и соответственно поперечные силы ВЧ-поля ЗС и пространственного заряда не

учитываются [4]. Расчеты выполнялись по трёхслойной модели электронного пучка.

1 Математическая модель нерегулярной релятивистской лампы бегущей волны О-типа

При оптимизации ЛБВ-О использовались заимствованные из [1] нелинейные уравнения, которые для многослойной модели можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dV_{ki}}{dT} &= \frac{\varepsilon \theta_0}{V_{ki} \gamma_k^3} \left[e_k(T) \sqrt{\rho_s(T)} A \cos \psi_{ki} - S_q F_{ki} \right], \\ \frac{du_{ki}}{dT} &= \frac{\theta_0}{\varepsilon} \left(\frac{1}{V_{ki}} - 1 \right), \\ \frac{dA}{dT} &= \frac{2\theta_0 \sqrt{\rho_s(T)}}{n} \sum_{k=1}^m \left[i_k e_k(T) \sum_{i=1}^n \cos \psi_{ki} \right], \\ \frac{d\mathcal{G}}{dT} &= \frac{2\theta_0 \sqrt{\rho_s(T)}}{An} \sum_{k=1}^m \left[i_k e_k(T) \sum_{i=1}^n \sin \psi_{ki} \right], \\ \psi_{ki} &= u_{ki} - \Phi(T) + \mathcal{G}, \\ \gamma_{ki} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_0^2 V_{ki}^2}}, \quad i = 1, n, \quad k = 1, m, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $T = z/L$, z – продольная координата, L – длина области взаимодействия;

$$V_{0k} = \frac{v_{0k}}{v_0}, \quad V_{ki} = \frac{v_{ki}}{v_0}, \quad \beta_0 = \frac{v_0}{c};$$

v_{0k} , v_{ki} – соответственно начальная и текущая скорость i -го электрона из k -го слоя; v_0 – средняя начальная скорость электронов; $u_{ki} = \omega t(T, t_{ki}) - h_e z + \omega t_{ki}$ – относительная фаза электрона; t_{ki} –

момент попадания электрона в область взаимодействия; $t(T, t_{ki})$ – момент прохождения сечения z i -электроном из k -го слоя; $h_e = \omega/v_0$; ω – рабочая частота; $\theta_0 = \varepsilon h_e L$, $\varepsilon = (K_s(0)I_0 e)/(m_0 2v_0^2)$ – параметр усиления, определённый во входном сечении; $K_s(T)$ – сопротивление связи; I_0 – полный ток пучка; e , m_0 – соответственно заряд и масса покоя электрона;

$$p_s(T) = \frac{K_s(T)h_s^2(T)}{K_s(0)h_s^2(0)}, \quad h_s(T) = \frac{\omega}{v_\phi(T)};$$

$v_\phi(T)$ – фазовая скорость холодной волны;

$$A(T) = \frac{eE_m(T)}{m_0\omega v_0 \varepsilon^2 \sqrt{\rho_s(T)}},$$

$E_m(T)$ – усредненная по сечению пучка амплитуда z -составляющей напряженности электрического поля волны, возбуждённой в ЗС попутной волны, ω – ее фаза;

$$\Phi(T) = \frac{\theta_0}{\varepsilon} \int_0^T \frac{1 - V_\phi(T)}{V_\phi(T)} dT$$

– набег фазы холодной волны; $V_\phi(T) = v_\phi(T)/v_0$ – относительная холодная фазовая скорость (холодная скорость – скорость, которая нормирована к потоку электронов); $S_q = \varepsilon/(v_0 \varepsilon_0 K_s(0))$ – параметр пространственного заряда;

$$F_{ki} = \frac{4}{\pi n} \sum_{i=1}^m \frac{i_l}{r'_l} \times \frac{d_k d_l (u_{ij} - u_{ki}) \gamma_{lj}}{\sum_{j=1}^n [(d_l + d_k)^2 + (u_{li} - u_{ki})^2 \gamma_{ij}^2] [(d_l - d_k)^2 + (u_{li} - u_{ki})^2 \gamma_{ij}^2]}$$

– силовая составляющая поля пространственного заряда с учетом релятивистской скорости, $u_{ki} - \pi < u_{ij} \leq u_{ki} + \pi$, $lj \neq ki$; $r'_l = r_l h_e$, $d_l = (R_0 - r_l) h_e$, $d_k = (R_0 - r_k) h_e$, r_l и r_k – соответственно радиусы l -го и k -го электронных слоев; R_0 – радиус ЗС; i_k , e_k – соответственно весовые коэффициенты тока и поля, относящиеся к k -му слою; $i_k = I_{0k}/I_0$, $\sum_{k=1}^m i_k = 1$ – полный ток на входе в k -ый слой; I_0 – общий ток электронного пучка;

$$e_k(T) = \frac{\frac{1}{S_k} \int_{S_k} E_z^0(r, T) dS_k}{\frac{1}{S_e} \int_{S_e} E_z^0(r, T) dS_e},$$

S_e – полное сечение пучка, S_k – площадь поперечного сечения k -го слоя пучка; $E_z^0(r, T)$ – зависящая от радиуса осевая составляющая напряженности электрического поля синхронной гармоника собственной волны ЗС.

Граничные условия для значений величин V и A системы (1.1) по обе стороны границы раздела i -го и k -го слоёв имеют вид:

$$V_{ki}(0) = V_{0k}, \quad u_{ki}(0) = -\frac{\pi}{2} + 2\pi \frac{i-0,5}{n}, \quad (1.2)$$

$$A(0) = A_0, \quad \mathcal{G}(0) = 0.$$

Электронный КПД (КПД отдачи энергии электронами волне, т.е. отношение отданной электронами энергии к их начальной энергии) и электронный КПД k -го слоя в рассматриваемой модели определяются следующим образом:

$$\eta_e = \sum_{k=1}^m i_k \eta_{ek}, \quad \eta_{ek} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\gamma_{jk} - \gamma_{0k}}{1 - \gamma_{0k}}. \quad (1.3)$$

Волновой КПД η_v (отношение полученной энергии волны, к затраченной – начальной энергии электронов) может быть представлен в форме:

$$\eta_v = 0,25\varepsilon[A^2(T) - A_0^2](\gamma_0 + 1)/\gamma_0^2. \quad (1.4)$$

Группировку электронов удобно характеризовать функцией вида:

$$G_r(T) = \left[\left(\frac{1}{nm} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \cos \psi_{ki} \right)^2 + \left(\frac{1}{nm} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sin \psi_{ki} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Нулевое значение G_r соответствует отсутствию группировки, $G_r=1$ – соответствует полной группировке.

Приближённая оптимизация фазы $\Phi(T)$, определяющей распределение $V_\phi(T)$, выполнялась методом синхронного электрона, как это сделано в [1]–[3]. Полная относительная фаза синхронного электрона среднего слоя задана в виде:

$$\psi_s(T) = u_s(T) + \mathcal{G}(T) - \Phi(T) = \frac{\pi}{2} - \delta_0 - \delta_1 T^{\delta_2}. \quad (1.6)$$

Проводя оптимизацию параметров δ_0 , δ_1 с соблюдением требования максимальности величины η_v при рассчитываемых на каждом шаге самосогласованных значениях $u_s(T)$ и $\mathcal{G}(T)$, можно с использованием выражения (1.6) определить оптимальную функцию $\Phi(T)$ и, следовательно, $V_\phi(T)$ [2]:

$$V_\phi(T) = \frac{1}{\varepsilon \frac{d\Phi}{dT} + \frac{\theta_0}{T}}. \quad (1.7)$$

2 Характеристики замедляющей системы

При расчете дисперсионных характеристик ЗС, а также входящих в уравнение (1.1) переменных p_s , e_k , являющихся функциями от $V_\phi(T)$ и $r(p_s = p_s[V_\phi(T), r])$, $e_k = e_k[V_\phi(T), r]$, описанная в [4] методика и, в частности, заимствованная из этой монографии формула (4.50) использованы для ЗС типа гребенчатого волновода с постоянным радиусом зуба (конечной толщины) и изменяющейся глубиной канавки (эскиз профиля волновода изображен на рисунке 2.2 пунктирной линией).

В расчетах были использованы следующие нормированные к $\lambda/(2\pi)$ размеры ЗС: заданный внутренний радиус гребенки $R_0 = 2,6$; ширина канавки $a = 0,9$; ширина зуба $b = 0,5$. Глубина

канавки $R - R_0$ определяется внешним радиусом R гребенки, который варьировался в пределах $R_0 < R < 3,5$ ($R_0 = \text{const}$). На рисунке 2.1 представлена рассчитанная при указанных размерах зависимость $\beta_\phi(R) = v_\phi(R)/c$. Кривой 2 изображена зависимость $\beta_\phi(R)$ для собственной волны E_{01} в гладком волноводе радиуса R (при $R = R_0$ значения $\beta_\phi(R)$ одинаковы для обеих кривых).

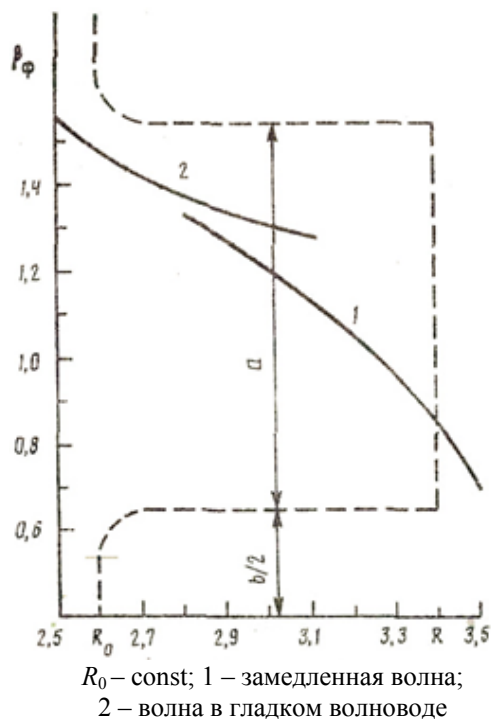


Рисунок 2.1 – Зависимость холодной фазовой скорости основной гармоники E_{01} – волны круглого гребчатого волновода от внешнего радиуса канавки R

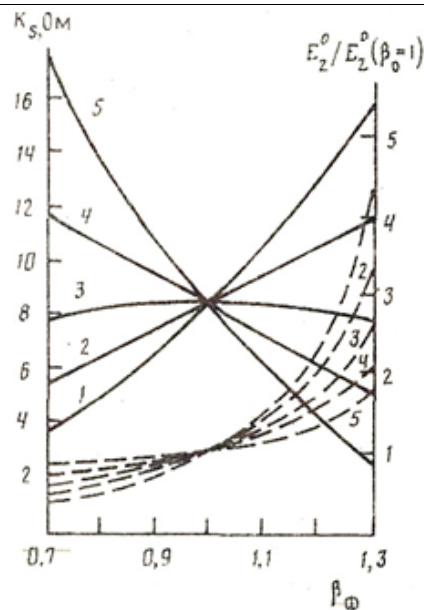
На рисунке 2.2 представлены зависимости сопротивления связи $K_s(\beta_\phi, r)$ «тонкого» трубчатого электронного пучка радиуса r и зависимости $E_0(\beta_\phi, r)$, которые определяют p_s и e_k в системе уравнений (1.1) при заданных R_0, a, b , приведенных выше, и разных r . Такие зависимости должны учитываться в табличном или аналитико-числовом виде.

После обработки системы уравнений (1.1) с использованием метода наименьших квадратов были получены следующие, удобные для применения формулы:

$$K_s(\beta_\phi, r) h_s^2(\beta_\phi) \cong 8,377 \beta_\phi^{9,47-5,66r};$$

$$E_z^0(\beta_\phi, r) / E_z^0(1, r) \cong \beta_\phi^{6,59-0,95r^2}.$$

Приведенные зависимости могут быть использованы для воспроизведения геометрических размеров оптимизируемой ЗС, а также в целях учёта влияния параметров этих зависимостей в уравнениях системы (1.1) при конкретных условиях.



1 – $R = 1,6$; 2 – $R = 1,8$; 3 – $R = 2,0$;
4 – $R = 2,2$; 5 – $R = 2,4$

Рисунок 2.2 – Зависимости сопротивления связи K_s (сплошная линия) и относительной напряженности поля основной гармоники E_z^0 (штриховая линия) от фазовой скорости волны

3 Оптимальные параметры

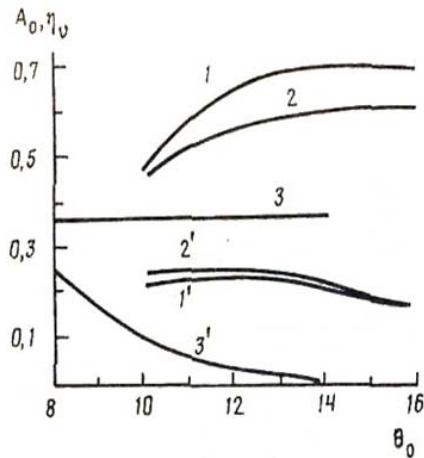
При оптимизации использовался специально организованный метод Нелдера–Мида и отбрасывались варианты условий, в которых скорость хотя бы одной из крупных частиц, используемых для моделирования электронного пучка, уменьшалась до нуля. Кроме того, при расчетах, выполненных на основе метода синхронного электрона, для холодной фазовой скорости волны было введено ограничение снизу: если расчетная V_ϕ оказывалась меньше $V_{\phi\text{мин}}$, определяемой возможностями ЗС ($R = 3,5$), то далее в ходе исследования V_ϕ оставалась на уровне $V_{\phi\text{мин}}$.

Ниже приведены результаты расчетов, выполненных для типичного трубчатого пучка, получаемого в электронной пушке с катодом со взрывной эмиссией, при следующих значениях параметров: относительный радиус пучка $r_{\text{мин}} = 1,75$; $r_{\text{макс}} = 2,25$; $\beta_0 = 0,85$; $I_0 = 2000\text{А}$; $\varepsilon = 0,22$; $K_s(0) = 8,3$ Ом.

При расчетах значения геометрического параметра варьировались в диапазоне $\theta_0 = 8 \dots 16$. Для нерегулярной или для регулярной ($V_\phi = V_{\phi 0} = \text{const}$) ЗС оптимизировались амплитуды сигнала A_0 и параметры δ_0, δ_1 и δ_2 .

Регулярная замедляющая система. Для однослойной модели регулярной ЛБВ-О показано, что при заданных параметрах максимально достигаемый волновой КПД равен $\eta_v = 0,34$. При возрастании θ_0 в диапазоне $8 \dots 14$ оптимальное значение величины τ_v остается на

одном уровне, оптимальное значение $V_{\phi 0}$ медленно меняется вблизи значения $V_{\phi 0} = 0,92$ – в диапазоне $0,917...0,925$, а амплитуда сигнала A_0 уменьшается почти на порядок – от $A_0 = 0,249$ до $0,018$ (рисунок 3.1, кривые 3 и 3').



1 – η_v ; 1' – A_0 при $V_{\phi \text{ мин}} = 0,82$; 2, 2' – $V_{\phi \text{ мин}} = 0,925$; 3, 3' – регулярная ЛБВ-О, $V_{\phi 0} = 0,925$

Рисунок 3.1 – Зависимость волнового КПД и амплитуды сигнала от параметра θ_0

В результате расчета, выполненного с использованием трехслойной модели с однородным распределением тока и начальной скорости в слоях при $\beta_0 = 10$, показано, что радиальное распределение поля волны практически не сказывается на величине η_v (уменьшение на 1%).

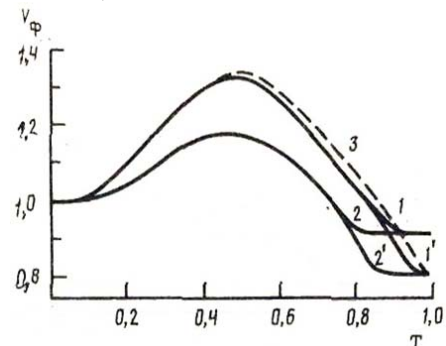
Нерегулярная ЛБВ-О, однослойная модель. Для выяснения характера влияния различных параметров на условия реализации оптимальных режимов вначале были выполнены расчеты на основе однослойной модели с использованием двух различных нижних предельных значений фазовой скорости – $K_{\phi \text{ мин}} = 0,925$ (его выбор обусловлен желанием сравнить полученные результаты с теми, которые получены для регулярной ЛБВ-О; для неё данное значение $V_{\phi 0}$ было оптимальным) и $V_{\phi \text{ мин}} = 0,83$ (это значение было предельно возможным для ЗС, геометрические параметры которой указаны выше).

Результаты расчетов приведены на рисунках 3.1 и 3.2. Анализируя эти результаты, видим, что наличие нерегулярности задерживающей системы только на участке группирования ($V_{\phi \text{ мин}} = 0,925$) обуславливает значительное увеличение η_v по сравнению со значением этой величины для регулярной ЛБВ-О. При увеличении θ_0 это различие в значениях η_v усиливается, что обусловлено существенным увеличением степени группировки и качества получаемого сгустка (рисунок 3.1). Заметим, что при $\theta_0 < 10$ при использованных значениях параметров оптимизация неоднородности задерживающей системы методом синхронного электрона не обеспечивает существенного выигрыша в КПД по сравнению с КПД регулярной ЗС. При превышении величиной θ_0 значения

$\theta_0 = 13$ величина η_v увеличивается очень медленно; при этом амплитуда A_0 начинает уменьшаться. Поэтому можно считать, что $\theta_0 = 13$ является достаточным значением параметра θ_0 , и изготовление более длинной задерживающей системы нецелесообразно [3].

Явный вид зависимости $V_{\phi}(T)$ представлен на рисунке 3.2 для двух значений θ_0 . С ростом θ_0 возрастает величина необходимого превышения величиной V_{ϕ} её синхронного значения $V = 1$. Заметим, что при наложении ограничения $V_{\phi} \geq V_{\phi \text{ мин}}$ на конечном участке ЛБВ-О существенного изменения хода кривой $V_{\phi}(T)$ в области группирования не происходит. Кривые $V_{\phi}(T)$, соответствующие $V_{\phi \text{ мин}} = 0,925$ и $V_{\phi \text{ мин}} = 0,82$, совпадают до тех пор, пока $V_{\phi} > V_{\phi \text{ мин}}$; с нарушением этого условия поведение указанных кривых различно.

Варианты нерегулярных ЛБВ, полученные с использованием трехслойной модели. При отклонении значений V_{ϕ} в том или ином направлении от значения 1,176, которому соответствует $\beta_{\phi} = 1$, влияние радиальной неоднородности поля проявляется в соответствии с зависимостью, графически представленной на рисунке 2.2. Поэтому можно ожидать, что зависимость $V_{\phi}(T)$, полученная с использованием однослойной модели, не окажется оптимальной, если брать в расчёт число слоёв больше одного. Для выяснения влияния расслоения был выбран вариант задерживающей системы с параметрами $\theta_0 = 13$, $V_{\phi \text{ мин}} = 0,82$, и с использованием распределения $V_{\phi \text{ мин}}(T)$, полученного при таких значениях параметров θ_0 и $V_{\phi \text{ мин}}$ для однослойной модели, проведен расчет η_v для трёхслойной модели. Оказалось, что из-за радиальной неоднородности значение η_v уменьшилось от 0,68 до 0,55. Несмотря на это обстоятельство эффективность нерегулярной задерживающей системы заметно выше, чем эффективность регулярной задерживающей системы.

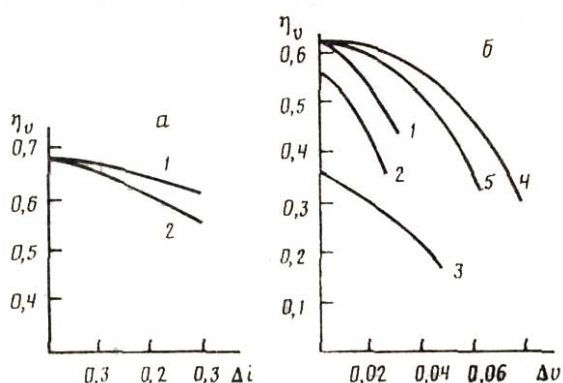


1 и 1' – $\theta_0 = 13$ при $V_{\phi \text{ мин}} = 0,925$ и $0,820$ соответственно, однослойная модель;
2 и 2' – $\theta_0 = 10$ при $V_{\phi \text{ мин}} = 0,925$ и $0,820$ соответственно, однослойная модель;
3 – $\theta_0 = 13$, $V_{\phi \text{ мин}} = 0,820$, трёхслойная модель

Рисунок 3.2 – Изменение холодной фазовой скорости вдоль ЛБВ-О

Для уточнения зависимости $V_{\phi}(T)$ для трёхслойной модели расчёты КПД ЛБВ-О были выполнены методом синхронного электрона. На рисунке 3.2 кривая 3 изображает зависимость $V_{\phi}(T)$, полученную в предположении равномерного распределения тока и начальных скоростей в поперечном сечении пучка ($i_1 = i_2 = i_3 = 1/3$, $V_{ok} = 1$). Видно, что при указанных значениях параметров и $A_0 = 0,28$ КПД задерживающей системы достигает значения $\eta_v = 0,61$, которое на 6% превышает значение η_v , вычисленное с использованием однослойной модели.

Для изучения зависимости КПД от функции распределения тока по сечению пучка расчёты были выполнены в предположении равномерного распределения начальной скорости $V_{oi} = 1$ и следующих значений силы тока в слоях: $i_1 = \Delta i$, $i_2 = 1 - \Delta i$, $i_3 = \Delta i$. На рисунке 3.3, а представлена зависимость η_v от Δi ($\Delta i = 0$ соответствует однослойной модели). Видно, что расщепление исходного моноскоростного пучка, обусловленное поперечной неоднородностью амплитуды волны, незначительно сказывается на результирующем КПД, если амплитуду входного сигнала A_0 увеличить с 0,23 до 0,28 (уменьшение η_v приблизительно на 7% при определении $V_{\phi}(T)$ на основе трёхслойной модели, и приблизительно на 12% – при использовании однослойной модели).



- 1 – $V_{\phi}(T)$ получена на основе трёхслойной модели с оптимизацией при каждом значении Δi , Δv ;
 2 – $V_{\phi}(T)$ получена с использованием однослойной модели;
 3 – регулярная задерживающая система, $V_{\phi 0} = 0,925$;
 4 и 5 – $V_{ok} = 1 - \Delta v$ и $V_{ok} = 1 + \Delta v$ соответственно;
 $V_{\phi}(T)$ получена на основе трёхслойной модели при $V_{ok} = 1$, $\Delta i = 0,3$

Рисунок 3.3 – Зависимость волнового КПД от величин, характеризующих поперечную неоднородность пучка, при $\theta_0 = 13$, $V_{\phi \text{ мин}} = 0,82$

О влиянии разброса скоростей в пучке на КПД ЛБВ-О можно судить на основе кривых 1 – 3, изображённых на рисунке 3.3, б и рассчитанных при следующих значениях начальных скоростей в слоях (первый слой – внутренний): $V_{01} = 1 - \Delta v$, $V_{02} = 1$, $V_{03} = 1 + \Delta v$. Кривые 4, 5 на рисунке 5, б соответствуют моноскоростному пучку – со средней начальной скоростью, отличающейся от синхронной скорости на Δv . При расчёте использовано распределение тока, соответствующее $\Delta i = 0,3$. Анализируя полученные результаты, приходим к выводу о том, что неоднородная ЛБВ-О более чувствительна к разбросу скоростей в пучке, чем однородная. При перепаде скоростей в пучке более 12% как неоднородная, так и однородная ЛБВ-О имеют одинаково низкий КПД $\eta_v = 10\%$. Кроме того, анализируя кривые 4 и 5 можно заключить, что моноскоростной на входе пучок не критично чувствителен к отклонению его средней скорости от её синхронного значения.

Заключение

В статье описана задача оптимизации параметров лампы бегущей волны О-типа. Рассмотрены различные варианты оптимизации: с использованием регулярной ЗС; нерегулярной ЗС – для однослойной модели пучка электронов; с использованием нерегулярной ЗС – для трёхслойной модели. Выполнено сравнение полученных результатов, на основе которого предложена оптимальная конфигурация нерегулярной ЗС для рассмотренных моделей ЛБВ-О.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кураев, А.А. Оптимизация по КПД нерегулярных релятивистских ламп бегущей волны О-типа / А.А. Кураев, А.К. Сеницын // Радиоэлектроника. – 1989. – Т. 34, № 6. – С. 1264.
2. Кураев, А.А. Оптимизация нерегулярной лампы бегущей волны О-типа на цепочке связанных резонаторов / А.А. Кураев, А.К. Сеницын // Радиоэлектроника. – 1989. – Т. 34, № 10. – С. 2166.
3. Кураев, А.А. Лампы с бегущей волной О-типа / А.А. Кураев, А.К. Сеницын, А.Б. Тимохин // Докл. АН БССР. – 1989. – Т. 33, № 11. – С. 989.
4. Абрамова, Н.Я. Применение неоднородных замедляющих систем для повышения электронного КПД ЛБВ О-типа / Н.Я. Абрамова, Л.Ф. Белякова, Г.Ф. Филимонов // Радиоэлектроника. – 1988. – Т. 33, № 4. – С. 778.

Поступила в редакцию 15.11.11.