

ОПТИМИЗАЦИЯ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ ВОЛНЫ В ОРОТРОНЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С НАКЛОННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПОТОКОМ

В. Д. Еремка¹, А. А. Кураев², А. К. Синицын²

¹*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*
E-mail: yeryomka@ire.kharkov.ua

²*Государственный университет информатики и радиоэлектроники,
6, ул. П. Бровки, Минск, 220600, Республика Беларусь*
E-mail: kuraev@gw.bsuir.unibel.by

Описаны результаты математического моделирования и оптимизации параметров оротрона с регулярным и нерегулярным периодами отражающей дифракционной решетки типа «гребенка». Описана разработанная методика оптимизации закона изменения периода «гребенки» на основе аппарата атомарных функций. Решение задачи оптимального управления осуществлено с учетом встречной волны. Для повышения эффективности энергообмена между электронным потоком и электромагнитным полем открытого резонатора применен «клинотронный эффект». Показано, что при углах $\alpha = 0,5^0 - 6^0$ наклона электронного потока к рабочей поверхности «гребенки» при оптимизированном законе изменения ее периода электронный КПД оротрона достигает 70%, тогда как при $\alpha = 0^0$ максимальный КПД не превосходит 50%. Ил. 4. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: оротрон, клинотрон, КПД, математическое моделирование и оптимизация, атомарные функции.

Известно, что генерацию электромагнитного излучения в оротронах (ледатронах) и лампах дифракционного излучения традиционной конструкции можно возбудить в двух режимах: генератора дифракционного излучения (ГДИ) и лампы обратной волны (ЛОВ) [1-3]. Как показали расчеты [4], в оротроне для обеспечения условий максимального КПД фазовую скорость замедленной волны и соответственно период его замедляющей системы (ЗС) - отражательной дифракционной решетки типа «гребенка» - необходимо монотонно уменьшать. В оротроне и ГДИ традиционной конструкции тонкий ленточный электронный поток движется параллельно рабочей поверхности «гребенки» на небольшом расстоянии от нее. Известно, что амплитуда замедленной волны экспоненциально уменьшается с удалением от поверхности «гребенки», причем тем сильнее, чем меньше период ЗС. Поэтому при уменьшении фазовой скорости вдоль «гребенки» уменьшается амплитуда действующей на ленточный электронный поток электромагнитной волны, что приводит к значительному снижению КПД. Нерегулярная ЗС способствует также подавлению режима ЛОВ.

Задача оптимального управления о находится оптимальной зависимости фазовой скорости волны, при которой обеспечивается максимальный КПД оротрона, решалась с использованием различных подходов и методов [4,5]. Использование в работе [4] принципа максимума Понтрягина и метода интерполяции полиномами Лагранжа показало, что успешная реализация этих методов требует как наложения целого ряда ограничений на гладкость функции управления, так и знания априорной информации для задания начальных значений коэффициентов полинома. В

работе [5] предложен метод синхронного электрона, позволяющий находить оптимальные зависимости фазовой скорости волны, обеспечивающие электронный КПД оротрона до 80%. Однако использование данного метода недопустимо, когда требуется учесть влияние встречной волны или дополнительные ограничения. Для решения задачи оптимального управления законом изменения периода «гребенки» с учетом встречной волны предложена и реализована методика, основанная на аппроксимации искомой зависимости обобщенным рядом, базисными функциями которого является набор сдвигов атомарной функции $UP(x)$ [6-8].

Нами представлены результаты исследований, которые показывают, что в оротроне традиционной конструкции падение КПД, вызванное уменьшением амплитуды и фазовой скорости электромагнитной волны, взаимодействующей с электронами вдоль «гребенки», можно компенсировать, направляя ленточный электронный поток под углом α к поверхности «гребенки».

1. Коаксиальный оротрон - клинотрон. Можно указать несколько факторов, ограничивающих электронный КПД оротронов и ГДИ традиционной конструкции:

– экспоненциальное уменьшение амплитуды поля поверхностной волны ЗС, взаимодействующей с тонким (толщина $\delta \ll \frac{1}{\beta}$) ленточным электронным потоком, по его поперечному сечению;

– неоптимальное распределение амплитуды поля поверхностной волны при симметричном расположении ЗС относительно оси симметрии открытого резонатора (ОР);

– применение регулярной ЗС - отражательной дифракционной решетки типа «гребенка» - способствует возбуждению генератора при одном и том же ускоряющем напряжении как в режиме оротрона на одной частоте, так и в режиме ЛОВ на другой частоте.

На рис. 1 схематически представлена конструкция коаксиального оротрона с наклонным электронным потоком. Оротрон содержит в себе электродинамическую систему - коаксиальный открытый резонатор, образованный двумя зеркалами 1, 2 в виде поверхностей внешнего и внутреннего соосно расположенных тел вращения. ЗС оротрона - отражательная дифракционная решетка 3 типа «гребенка», выполнена на рабочей поверхности внешнего зеркала 1 в виде углового отражателя, созданного поверхностями 4, 5, расположенными зеркально-симметрично относительно плоскости симметрии открытого резонатора, перпендикулярной оси устройства, и повернутого вершиною угла ψ к оси прибора, причем угол ψ при вершине имеет величину, которая лежит в интервале $168^\circ \leq \psi \leq 179^\circ$. Электронно-оптическая система (ЭОС) коаксиального оротрона снабжена основным 6 и дополнительным 7 кольцевыми эмиттерами, установленными на концах ЗС 3. ЭОС формирует трубчатые электронные потоки 8, 9 с толстой (толщина $\Delta \gg \delta$) стенкой. Устройство 10 для вывода высокочастотной энергии из ОР, снабженное щелями связи 11 с нагрузкой, расположено на внутреннем зеркале 2, выполненном в форме гиперболоида. Для фокусирования трубчатых электронных потоков 8, 9 применена магнитная фокусирующая система 12 из магнитотвердых материалов.

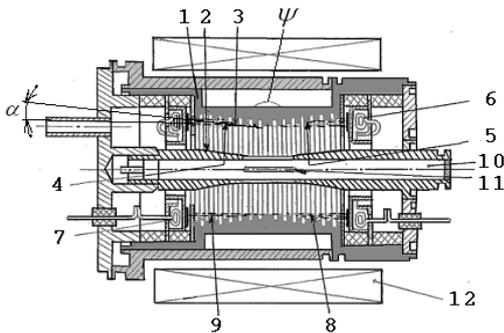


Рис. 1. Схематическое изображение коаксиального оротрона наклонным электронным потоком

Для повышения эффективности энергообмена при взаимодействии между электронами и электромагнитной волной ЗС в описаном оротроне трубчатые электронные потоки наклонены к рабочей поверхности ЗС. При этом острый угол между плоскостью симметрии каждого трубчатого электронного потока и плоскостью ЗС типа «гребенка» составляет $0,5^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$ (рис. 1). «Клиноотронный

эффект» [9] в оротроне способствует существенному повышению его КПД. ЭОС позволяет получать ток величиной в единицы ампер и при ускоряющих напряжениях 3-15 кВ обеспечивать необходимую для работы с высоким КПД величину амплитуды высокочастотного поля в пространстве взаимодействия коаксиального оротрона. ЗС - отражательная дифракционная решетка 3 типа «гребенка» на длине L выполнена с монотонно уменьшающимся периодом, что способствует, с одной стороны, повышению электронного КПД, с другой - устранению возможности возбудить генератор в режиме ЛОВ. Взаимодействие электронных потоков 8, 9, падающих на рабочую поверхность ЗС 3, осуществляется с замедленными волнами нарастающей интенсивности (гауссово распределение). Рабочая поверхность отражательной дифракционной решетки в представленной схеме коаксиального оротрона кроме функции ЗС выполняет функцию коллектора отработавших электронов. Реализация представленной схемы коаксиального оротрона в диапазоне 0,1-3,0 ТГц позволит создать источники электромагнитного излучения средней и большой мощности.

2. Математическая постановка задачи.

Математическая модель оротрона с нерегулярной гребенкой, обеспечивающей плавное изменение фазовой скорости синхронной гармоники в одномерном приближении на основе метода крупных частиц, записывается в виде [5]

$$\begin{cases} \frac{dV_i}{dT} = -\frac{\theta_0}{V_i \gamma_i^3} [g(T) A E_{zi} - S_q F_{qi}], \\ \frac{dU_i}{dT} = \theta_0 \left(\frac{1}{V_i} - 1 \right); \end{cases} \quad (1)$$

$$V_i(0) = 1; u_i(0) = -\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi(i-0,5)}{N}.$$

Здесь $T = \frac{z}{L}$; L - длина гребенки; $0 \leq T \leq 1$;

$V_1 = \frac{v_i}{v_0}$, v_0 - средняя скорость электронов на

входе в область взаимодействия;

$$\gamma_i = 1/\sqrt{1-v_i^2/c^2}; \quad u_i = \omega t_i - \omega/v_0 z;$$

$$\theta_0 = L\omega/v_0;$$

$$F_{qi} = \frac{1}{N} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \frac{4\Delta^2 (u_i - u_j)}{(u_i - u_j)^2 + 4\Delta^2} - \text{силовая}$$

функция пространственного заряда, $\Delta = \frac{2\pi y(T)}{(\lambda \beta_0)}$;

$$S_q = 1,17 \cdot 10^{-4} \frac{I_0 \lambda}{\beta_0^2 l_s}, \quad I_0 - \text{ток пучка, } l_s - \text{ширина}$$

пучка.

Нормированное поле синхронной гармоники с переменной фазовой скоростью представим в виде:

стоячая волна

$$E_{zi} = \sin(\omega t) \sin[\theta_0 \int_0^T \frac{dT}{V_{ph}(T)}], \quad (2)$$

синхронная волна

$$E_{zi} = \cos[\omega t - \theta_0 \int_0^T \frac{dT}{V_{ph}(T)}] = \cos[u_i - \theta_0 \int_0^T (\frac{1}{V_{ph}} - 1) dT], \quad (3)$$

где $\omega t = u_i + \theta_0 T$.

$g(T) = \rho(T) \sin^2 \pi T$ - функция распределения ВЧ поля вдоль гребенки;

$$\rho(T) = \exp\left(\frac{2\pi}{\lambda} \left[y_0 \sqrt{\left[\frac{1}{\beta_0 V_{ph}(0)} \right]^2 - 1} - y(T) \sqrt{\left[\frac{1}{\beta_0 V_{ph}(T)} \right]^2 - 1} \right]\right), \quad (4)$$

$$y(T) = y_0 + (y_1 - y_0)T; \quad (5)$$

$y(T)$ - расстояние от центра тонкого ленточного электронного пучка до решетки в сечении T ; y_0 , y_1 - начальное и конечное значения соответственно;

$A = \frac{e E_m}{m_0 \omega v_0}$, E_m - амплитуда ВЧ поля.

Волновой КПД, определяющий эффективность взаимодействия

$$\eta(T) = \frac{\theta_0 A (\gamma_0 + 1)}{\gamma_0^2} \int_0^T g(T) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{zi}(T) dT. \quad (6)$$

Качество взаимодействия оценивается функцией группировки

$$G_r = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \cos u_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sin u_i \right)^2}.$$

Выражение (4) учитывает уменьшение поля при удалении его от гребенки. Для компенсации снижения эффективности взаимодействия поля с пучком, последний предлагается пропускать под углом к гребенке, величина которого моделируется выражением (5).

Задача оптимального управления заключается в нахождении гладкой зависимости фазовой скорости $V_{ph}(T)$, а также параметров A и θ_0 , при которых обеспечивается максимум $\eta(1)$.

3. Аппроксимация зависимости $V_{ph}(T)$ линейной комбинацией сдвигов функции $UP(x)$. Представим искомую зависимость $V_{ph}(T)$ обобщенным рядом [6]

$$V_{ph}(T) = \sum_{k=1}^m a_k \varphi_k^{np}(T), \quad (7)$$

где $\varphi_k^{np}(T) = UP\left(\frac{nT - k + p}{p}\right)$; n - количество

отрезков, на которое разбивается интервал $[0,1]$; $2p$ - количество интервалов, перекрываемых финитной функцией $\varphi_k^{np}(T)$; $m = n - 1 + 2p$ - количество функций выбранного базиса, отличных от нуля на интервале $[0,1]$.

Уникальность этого разложения состоит в том, что, хотя функции $\varphi_k^{np}(T)$ имеют конечный носитель, обобщенный ряд (7) является бесконечно дифференцируемым, так как в крайних точках $x = \pm 1$ все производные функции $UP(x)$ равны нулю. Наличие p -перекрытий позволяет в отличие от обычного сплайна или полинома производить изменения между локальными и интегральными свойствами функции управления.

На рис. 2 представлена характерная зависимость фазовой скорости $V_{ph}(T)$, которая при значениях $A = 0,06$, $\theta_0 = 250$, $I_0 = 0,5$, $\beta_0 = 0,3$ обеспечивает КПД $\eta(1) = 0,78$. Кривая 1 получена в результате оптимизации $V_{ph}(T)$ по методу синхронного электрона, при этом расчет E_{zi} производился по формуле (3). Кривые 2 и 3 иллюстрируют аппроксимационные свойства разложения (5) при различных значениях p и n . Как видно из рис. 2, при $p = 1$ и $n = 5$ аппроксимирующая зависимость носит колебательный характер (кривая 2), что указывает на неудовлетворительное качество аппроксимации. Дальнейшее увеличение количества отрезков n приводит лишь к росту числа колебаний аппроксимирующей кривой, а качество аппроксимации при этом практически не улучшается. Увеличение p позволяет существенно улучшить качество аппроксимации даже при небольших значениях n (кривая 3).

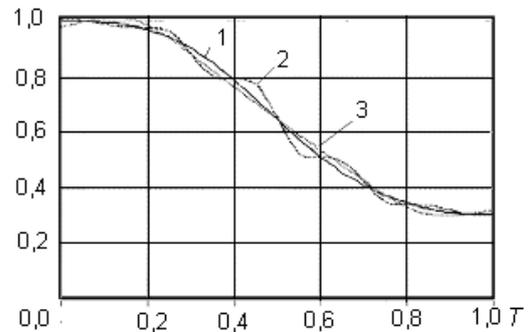


Рис. 2. Аппроксимация зависимости $V_{ph}(T)$: 1 - метод синхронного электрона; 2 - $p = 1$, $n = 5$; 3 - $p = 2$, $n = 3$

Отработана методика получения начальных значений параметров a_k при наличии некоторого закона управления, принимаемого за начальное приближение.

Использование обобщенного ряда (7) приводит задачу оптимального управления к задаче минимизации функции M переменных. Наличие дополнительных граничных условий позволяет уменьшить число оптимизируемых параметров. Задание граничных условий для управления при $T=0$ и $T=1$ легко учесть в выбранном разложении. Например, для граничного условия первого рода $V_{ph}(0) = V_{ph0}$ имеет место соотношение

$$V_{ph}^m(0) = \sum_{k=1}^{2p-1} a_k \varphi_k^{np}(0) = V_{ph0}, \quad \text{а так как}$$

$$\varphi_p^{np}(0) = 1, \quad \text{то } a_p = V_{ph0} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{2p-1} a_k \varphi_k(0). \quad \text{Для гра-$$

ничного условия второго рода $\frac{dV_{ph}(0)}{dT} = dV_{ph0}$

имеет место соотношение

$$\sum_{k=1}^{2p-1} a_k \frac{d\varphi_k^{np}}{dT}(0) = dV_{ph0}, \quad \text{из которого легко выра-$$

зить a_{p-1} , при этом $p \geq 2$. Аналогичные соотношения получаются на другом конце отрезка при $T=1$.

Расчеты показали, что удовлетворительное качество аппроксимации обеспечивается уже при $p=2$ и $n=5$, поэтому соотношения для коэффициентов a_k при учете граничных условий существенно упрощаются:

условия первого рода

$$a_2 = V_{ph0} - a_1 \varphi_1(0) - a_3 \varphi_3(0), \quad (8)$$

$$a_{m-1} = V_{ph1} - a_m \varphi_m(1) - a_{m-2} \varphi_{m-2}(1);$$

условия второго рода

$$a_1 = a_3 - dV_{ph0} \left/ \frac{d\varphi_3(0)}{dT} \right., \quad (9)$$

$$a_m = a_{m-2} - dV_{ph1} \left/ \frac{d\varphi_{m-2}(1)}{dT} \right..$$

При совместном использовании граничных условий первого и второго рода сначала по выражениям (9) вычисляются коэффициенты a_1 и a_m , а затем они подставляются в (8) и вычисляются коэффициенты a_2 и a_{m-1} .

4. Результаты оптимизации. Описанная выше методика использовалась для оптимизации параметров оротрона с учетом встречной волны. При этом расчеты производились следующим образом. Вначале по методу синхронного электрона

(без учета встречной волны) находилась оптимальная зависимость $V_{ph}(T)$. Затем для $n=5$ и $p=2$ находились значения коэффициентов a_k разложения (7). Эти значения использовались как начальное приближение для последующей оптимизации КПД с учетом встречной волны.

В случае использования прямолинейного электронного пучка, при $y(T) = y_0$ в выражении (5), для метода синхронного электрона получено значение $\eta(1) = 0,513$. После проведения оптимизации получены следующие значения параметров: $A_0 = 0,063$, $\theta_0 = 250$, $a_1 = 0,82167$, $a_2 = 0,17195$, $a_3 = 0,84174$, $a_4 = 0,13111$, $a_5 = 0,65664$, $a_6 = -0,0052$, $a_7 = 0,656$, которые обеспечивают КПД (с учетом встречной волны) равный 0,499 (рис. 3). Для сравнения: регулярная решетка даже при оптимизации величины $V_{ph} = \text{const} = 0,937$ обеспечивает КПД $\eta = 0,175$.

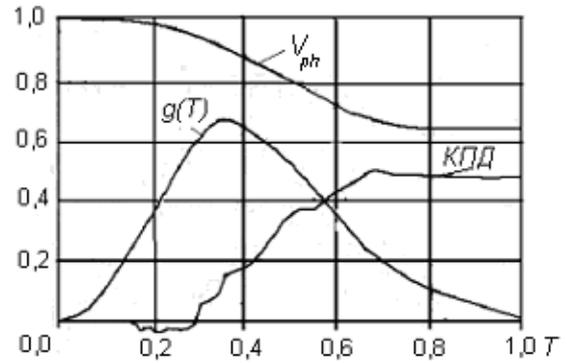


Рис. 3. Зависимости основных характеристик процесса взаимодействия с учетом встречной волны в оротроне с нерегулярной ЗС при $\alpha = 0^\circ$

Использование наклонного пучка позволяет поднять КПД до величины 0,726 при расчете методом синхронного электрона и следующих значениях параметров: $A_0 = 0,063$, $d_0 = 0,07$, $d_1 = 0,0067$, $y_0 = 0,1$, $y_1 = 0,03$, в то время как для регулярной решетки $\eta = 0,182$ при $V_{ph} = 0,943$. Оптимизация варианта с учетом встречной волны дает значение КПД $\eta(1) = 0,716$ при следующих значениях параметров: $a_1 = 0,66227$, $a_2 = 0,31372$, $a_3 = 0,6832$, $a_4 = 0,23424$, $a_5 = 0,38893$, $a_6 = 0,0021$, $a_7 = 0,32028$.

Выводы. На рис. 4 приведены типичные зависимости основных характеристик процесса взаимодействия с учетом встречной волны в оротроне с наклонным электронным потоком.

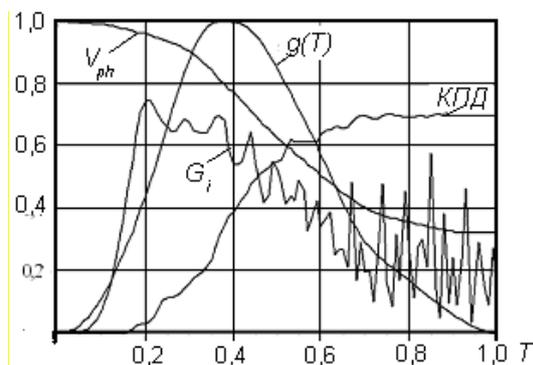


Рис. 4. Зависимости основных характеристик процесса взаимодействия с учетом встречной волны в оротроне с нерегулярной ЗС и наклонным электронным потоком при $0,5^{\circ} \leq \alpha \leq 6^{\circ}$

Применение в оротронах ЗС типа «гребенка» с монотонно уменьшающимся периодом обеспечивает увеличение его КПД и исключает возможность возбуждения генерации в режиме ЛОВ. Использование в оротронах клинотронного эффекта позволяет применить в них ЭОС, формирующие «толстые» электронные потоки, и существенно повысить КПД (более 70%) при работе в генераторном режиме.

Разработана методика оптимизации закона изменения шага «гребенки» на основе аппарата атомарных функций. Расчеты показывают, что при подборе угла наклона электронного потока в интервале $0,5^{\circ} \leq \alpha \leq 6^{\circ}$ удается достичь КПД 70%, в то время как при $\alpha = 0^{\circ}$ максимальный КПД не превосходит 50% при прочих равных условиях.

1. Богомолов Г. Д., Бородин А. И., Куц В. С. и др. Исследование возбуждения системы типа «гребенка» в оротронном режиме и режиме ЛОВ // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. - 1970. - Вып.1. - С.97-101.
2. Балаклицкий И. М., Курин В. Г., Скрынник Б. К. О возможности работы генератора дифракционного излучения в режиме лампы обратной волны // Укр. физ. журн.-1970. - №5. - С.717-724.
3. Mizuno K. and Ono S. The Ledatron. Infrared and Millimeter Waves. Chapter 5 / Academic Press. New York. - 1979. - 1. - P.83-100
4. Тарасов М. М., Третьяков О. А., Шматько А. А. Оптимизация фазовой скорости волны в генераторах оротронного типа. // Радиотехника и электроника. - 1987. - 32, №6. - С.1286-1290.
5. Кураев Н. А., Синицын А. К. Исследование автофазного режима в релятивистском оротроне. // Радиотехника и электроника. - 1987. - 32, №11. - С.2427-2431.
6. Кравченко В. Ф., Рвачев В. А., Рвачев В. Л. Математические методы обработки сигналов на основе атомарных

функций. // Радиотехника и электроника. - 1995. - 40, №9. - С.1385-1392.

7. Кравченко В. Ф., Кураев А. А., Рвачев В. А. Атомарные функции в задачах оптимального управления динамическими системами. // Радиотехника. - 1997. - №9. - С.4-9.
8. Kravchenko V. F., Kuraev A. A., Sinitsyn A. K., Shakirin A. I. Optimization of the Variation of a Phase Velocity Wave in a Orotron of Millimeter Band Based of Atomic Function. MSMW'98 Symposium Proceedings. Kharkiv, Ukraine, September 15-17, 1998. - P.405-406.
9. Клинотрон / Левин Г. Я., Бородин А. И., Кириченко А. Я. и др. Под ред. А. Я. Усикова. - Киев: Наук. думка, 1992. - 200 с.

OPTIMIZATION OF PHASE WAVE VELOCITY IN A MILLIMETER WAVE INCLINED ELECTRON FLOW OROTRON

V. D. Yeryomka, A. A. Kurayev, A. K. Sinitsyn

The results from mathematical simulation and optimization of orotron parameters with regular and irregular periods of a “comb”-type reflecting diffraction grating are described. The developed technique for optimizing the law of changing the “comb” period in terms of the atomic function apparatus is described. To improve the efficiency of energy exchange between the electron flow and the electromagnetic field of an open resonator a “klynotron effect” is employed. It is shown that at angles $0,5^{\circ} \leq \alpha \leq 6^{\circ}$ of the electron flow inclination to a “comb” operating surface under the optimized law of changing its period the orotron electron efficiency runs up to 70%. Whereas at $\alpha = 0^{\circ}$ the maximum efficiency does not exceed 50%.

Key words: orotron, klynotron, efficiency, mathematical simulation and optimization, atomic function.

ОПТИМІЗАЦІЯ ФАЗОВОЇ ШВИДКОСТІ ХВИЛІ В ОРОТРОНІ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ З НАХИЛЕНИМ ЕЛЕКТРОННИМ ПОТОКОМ

В. Д. Єрьомка, О. О. Кураєв, А. К. Сініцин

Описано результати математичного моделювання і оптимізації параметрів оротрона з регулярним та нерегулярним періодом відбиваючої дифракційної решітки типу «гребінка». Описана розроблена методика оптимізації закону зміни періоду «гребінки» на основі апарату атомарних функцій. Розв'язання задачі оптимального керування здійснено з врахуванням зустрічної хвилі. Для підвищення ефективності енергообміну між електронним потоком та електромагнітним полем відкритого резонатора застосовано «клинотронний ефект». Показано, що при кутах $0,5^{\circ} \leq \alpha \leq 6^{\circ}$ нахилу електронного потоку до робочої поверхні «гребінки» при оптимізованому законі зміни її періоду електронний ККД оротрона досягає 70%, тоді як при $\alpha = 0^{\circ}$ максимальний ККД не перевищує 50%.

Ключові слова: оротрон, клинотрон, ККД, математичне моделювання та оптимізація, атомарні функції.

Рукопись поступила 11 декабря 2006 г.