

## БЕСТОКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТОЙ КЛИНОТРОНА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО КОСЮЮ ГРЕБЕНКУ

В. А. Солодовник

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

Исследованы особенности нового способа управления частотой автоколебаний клинотрона с помощью специального электрода, расположенного в пространстве взаимодействия электронного потока с полями периодической структуры. Характерной особенностью этого способа является быстрое управление частотой выходного сигнала без заметных затрат мощности в цепи управления. Доказано, что в качестве замедляющей системы такой способ должен использовать плоские косые периодические структуры. Показана возможность управления крутизной модуляционной характеристики. Ил. 4. Библиограф.: 6 назв.

**Ключевые слова:** СВЧ, лампа обратной волны, электронно-оптическая система.

В связи с широким развитием электронных систем, решающих специальные и многофункциональные задачи, перед вакуумной электроникой сверхвысоких частот (СВЧ) во второй половине прошлого века возникли задачи по созданию источников колебаний, выходными параметрами которых можно управлять в широких пределах по наперед заданному закону. Эта проблема затронула также исследования и разработки источников колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Поэтому перед источниками колебаний средней мощности этих диапазонов были поставлены задачи по модуляции частоты выходного сигнала по сложным законам, в том числе осуществляемых и с помощью шумов. При этом элементы управления сигналом генератора должны отвечать определенным требованиям по скорости и диапазону перестройки, крутизне и линейности этих характеристик и т. п. Несмотря на то, что существует много способов управления частотой выходного сигнала в приборах СВЧ, на практике не всегда удается удовлетворить широким, иногда взаимно противоречивым по отдельным параметрам, требованиям, предъявляемым к выходным характеристикам сигнала в источниках миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Несмотря на то, что клинотрону [1], одному из представителей широкодиапазонных генераторов типа лампы обратной волны (ЛОВ) О-типа [2] присущее свойство электрического управления выходными характеристиками в широких пределах с помощью напряжения, ускоряющего электроны, такой способ управления выходным сигналом не всегда удовлетворяет поставленным требованиям. В ряде случаев изменение рабочего тока при перестройке по частоте сопровождается заметным изменением выходной мощности. Эта особенность, присущая генераторам с длительным взаимодействием, в которых электронный пучок формируется диодной элект-

ронно-оптической системой (ЭОС), или существует неудовлетворительное согласование выходного устройства и согласованной поглощающей нагрузки. Кроме того, управление частотой этим способом осуществляется при заметном потреблении мощности в цепи управления, что вызывает определенные трудности в процессе эксплуатации. Это требует искать иного способа управления частотой клинотрона с помощью специального электрода, располагаемого в пространстве взаимодействия электронного потока с полями замедленной электромагнитной волны периодической структуры. Такой путь был найден в новом конструктивном решении ЛОВО клинотрона [3]. Характерной особенностью нового способа управления частотой ЛОВО клинотрона явилось быстрое управление частотой колебаний без существенных затрат мощности в цепи управления. В качестве замедляющей системы такой способ предполагает использование плоской косой периодической структуры [4], у которой штрихи периода не перпендикулярны к направлению движения электронного потока.

**1. Основные соотношения.** В одномерной периодической структуре (однородной вдоль оси  $Y$  и периодической вдоль оси  $Z$ ) распространение поверхностной волны в плоскости  $X = 0$  можно рассматривать в произвольном направлении [4]. При этом фазовая скорость распространения волны вдоль оси  $Y$  равна скорости света в свободном пространстве -  $c(V_y = c)$ , а в направлении оси  $Z$  - она минимальна  $V_z$ .

Выражение для скорости волны под произвольным углом  $\psi$  к оси  $Z$  имеет вид [4]

$$V_\psi = \frac{V_z}{\cos\psi - \frac{V_z}{V_y} \sin\psi}. \quad (1)$$

В случае больших замедлений фазовой скорости ( $c/V_z \geq 10$ ) и для углов  $\psi \leq 45^\circ$  соотношение (1) упрощается

$$V_\psi = \frac{V_z}{\cos\psi}. \quad (2)$$

Естественно, возбуждение периодической системы можно производить электронным потоком, движущимся в плоскости  $X = 0$  под произвольным углом  $\psi$  к оси  $Z$ . Тогда в пределах справедливости соотношения (2) можно утверждать, что изменение направления движения электронного потока в плоскости  $X = 0$  при постоянной скорости его движения ( $V_{e\psi} = \text{const}$ ) приводит к изменению проекции вектора  $V_{e\psi}$  на ось  $Z$  ( $V_{ez}$ ), что равнозначно изменению величины периода системы в направлении движения электронов (рис. 1).

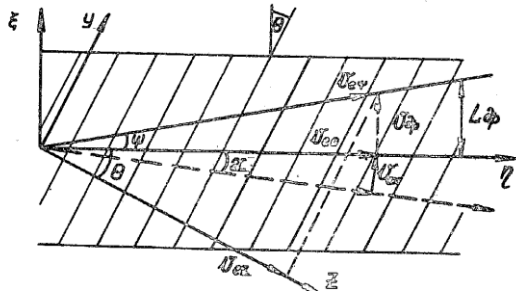


Рис. 1. Диаграмма составляющих скорости электронного потока

Если предположить при этом наличие примерного синхронизма скорости электронного потока  $V_{e\psi}$  с полем замедляющей системы ( $V_{e\psi} \square V_\psi$ ), то с изменением направления движения потока должна изменяться и возбуждаемая частота в соответствии с законом дисперсии периодической системы.

При небольших изменениях длины волны  $\lambda$  и возбуждении гребенчатой периодической системы, имеющей аномальную дисперсию на минус первой пространственной гармонике, выполняется соотношение

$$\frac{c}{V_z} \cong \alpha\lambda, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от  $\lambda$  [2].

Таким образом, если над гребенкой пропускать электронный поток с постоянной по абсолютной величине скоростью и изменять направление его движения в плоскости взаимодействия  $X = 0$ , изменением угла  $\psi$ , то можно управлять длиной генерируемой волны согласно соотношению

$$\lambda = \frac{c}{\alpha V_{e\psi} \cos\psi}. \quad (4)$$

При изменении угла  $\psi$  в интервале от 0 до  $10^\circ$  можно производить изменение частоты на несколько десятых процента, что в 8-мм диапазоне составляет десятки мегагерц [5].

Если электронный поток формируют продольным магнитным полем  $B$  конечной величины, то направление движения электронного потока можно изменять, воздействуя на него поперечным электрическим полем. Такое поле в пространстве взаимодействия можно получить, например, поместив в него специальный электрод в виде проводящей пластины, сетки или решетки вдоль всего пространства взаимодействия. Электрод с потенциалом  $U_{упр}$ , расположенный над электронным потоком параллельно поверхности периодической структуры  $X = 0$  на расстоянии  $b$  от нее, формирует электрическое поле, вектор напряженности которого  $E_x$  перпендикулярен направлению движения электронов в пространстве взаимодействия. При этом, двигаясь вдоль оси  $Z$ , электронный поток будет испытывать дрейф в плоскости  $X = 0$  в направлении оси  $Y$ . Скорость дрейфа можно определить из соотношения

$$V_{др} = 10^8 \frac{E_x}{B} = 10^8 \frac{U_{упр}}{bB}. \quad (5)$$

Скорость движения электронов под углом  $\psi$  к оси  $Z$  определится соотношением

$$V_{e\psi} = \frac{V_{ez}}{\cos\psi}. \quad (6)$$

Следует особо отметить, что если в качестве замедляющей системы в ЛОВО применена обычная прямая гребенка, то при дрейфе электронного потока в направлении перпендикулярном оси  $Z$  составляющая скорости электронов на эту ось, а следовательно, и частота автоколебаний не изменится. Ведь одновременно с изменением скорости пучка (6) аналогичным образом изменится и скорость замедленной электромагнитной волны в соответствии с соотношением (2). Чтобы достичь эффекта изменения частоты при подаче на электрод потенциала  $U_{упр}$ , необходимо задать начальное направление движения электронного потока под углом  $\theta \neq 0$  к оси  $Z$  в плоскости  $X = 0$  до подачи управляющего потенциала. Потенциал  $U_{упр}$  изменит направление движения электронов на угол  $\psi$  относительно направления  $\theta$ . Таким образом

$$\sin\psi = \frac{V_{др}}{V_{e\psi}}, \quad (7)$$

а проекция  $V_{e\psi}$  на ось  $Z$

$$V_{ez} = V_{e\psi} \cos \theta \pm \psi \quad (8)$$

Задавая величину угла  $\theta$ , можно регулировать чувствительность управляющего электрода (при  $\theta \rightarrow 0$  управляющее действие электрода снижается). Так как скорость  $V_{e\theta}$  электронного потока под углом  $\theta$  к оси  $Z$  периодической системы определяется потенциалами диодной ЭОС, то с помощью потенциала  $U_{упр}$  можно управлять частотой автоколебаний согласно соотношению

$$f = \alpha \left( V_{e\theta} \cos \theta \pm 10^8 \frac{U_{упр}}{bB} \sin \theta \right), \quad (9)$$

которое можно получить, используя соотношения (3), (5), (7) и (8). Знак перед вторым слагаемым в (9) определяется направлением дрейфа потока, которое зависит от направления силовых линий индукции магнитного поля  $B$ . При этом предполагается конечность значения фокусирующего магнитного поля. При  $B \rightarrow \infty$  дрейф электронов отсутствует.

**2. Постановка эксперимента.** Исследования возможности бестокового управления частотой колебаний проводилось на лабораторных макетах ЛОВО клинотрона в 8-мм диапазоне [6]. В экспериментах использовалась замедляющая система типа косая гребенка, ламели которой нарезаны как перпендикулярно основанию, так и под углами  $\theta_1 = -10^\circ$  и  $\theta_2 = +15^\circ$  относительно нормали к оси замедляющей системы (рис. 1). Ширина замедляющей системы - 5 мм, длина -  $L = 25$  мм. Периоды замедляющих систем по нормали к ламелям для всех макетов были одинаковыми и равнялись 0,5 мм с коэффициентами заполнения равными 0,5. Косая гребенка, используемая для создания определенной крутизны характеристик управления частотой автоколебаний, позволяла обеспечивать однозначность зависимости частоты от поворота электронного потока в плоскости замедляющей системы  $X = 0$ , т. е. от угла  $\psi$ .

Над поверхностью гребенки (параллельно плоскости  $X = 0$ ) на расстоянии  $b = (0,5 \div 4)$  мм был установлен управляющий электрод в виде проводящей пластины с выводом, изолированным от корпуса макета. Для создания постоянно действующей на электронный поток во всем пространстве взаимодействия силы, размеры управляющего электрода выбирались равными размерам замедляющей системы как по длине, так и по ширине.

Возбуждение косой гребенки производилось ленточным электронным потоком сечением  $(2 \times 0,4)$  мм<sup>2</sup>, формируемым диодной ЭОС. Поло-

жение электронного потока относительно периодической замедляющей системы фиксировалось продольным фокусирующим магнитным полем. Измерения проводились для двух направлений силовых линий индукции магнитного поля, обеспечивающих противоположные направления дрейфа электронного потока в направлении оси  $Y$  в плоскости  $X = 0$ . Магнитное поле с северным полюсом у ЭОС и южным полюсом у коллекторного конца макета обозначили  $B_{NS}$ , и наоборот, -  $B_{SN}$ . Поворот электронного потока в плоскости замедляющей системы  $X = 0$  производился подачей напряжения на управляющий электрод.

Выбор ширины электронного потока осуществлялся компромиссными условиями постановки эксперимента. Так, с одной стороны, уменьшение ширины электронного потока ограничивается ростом стартового тока, с другой, - увеличение относительной ширины потока (отношение ширины потока к ширине гребенки) ограничивается необходимостью обеспечения максимального поворота потока в плоскости  $X = 0$  без выхода его за пределы замедляющей системы до прохождения всей длины пространства взаимодействия. При использовании потока шириной 2 мм этот поворот мог быть осуществлен в пределах угла  $\psi \leq 3,5^\circ$  до выхода электронного потока за пределы боковых границ гребенки до прохождения всей длины пространства взаимодействия, т. е. расширение пределов измеряемых углов  $\psi$  приводит к значительному росту значений стартового тока  $I_{ст}$ .

Исследования проводились при возбуждении косой гребенки на минус первой пространственной гармонике с замедлением  $cV_z > 10$ . На рис. 2 приведены дисперсионные зависимости для прямой и косых гребенок.

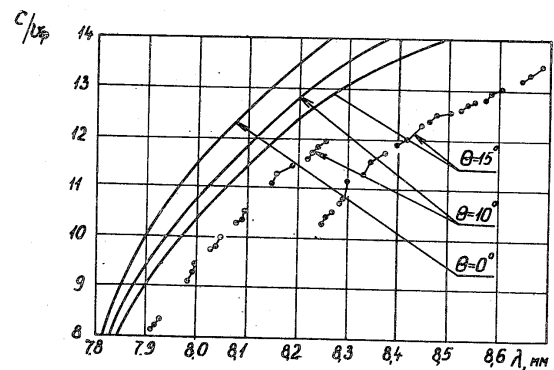


Рис. 2. Экспериментальные —●— и расчетные — дисперсионные зависимости прямой ( $\theta = 0$ ) и косых с углами нарезки  $\theta_1 = -10^\circ$  и  $\theta_2 = +15^\circ$  гребенок

Эти зависимости представляют собой отдельные участки дисперсионной характеристики, так как исследовалось автовозбуждение несоглас-

сованной на концах замедляющей системы. Здесь же представлены расчетные дисперсионные зависимости для обычной прямой и косых гребенок с углами нарезки  $\theta_1 = -10^\circ$  и  $\theta_2 = +15^\circ$ , имеющих такие же параметры (сплошные линии).

**3. Результаты эксперимента.** На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости изменения частоты автоколебаний ЛОВО от потенциала на управляющем электроде для двух значений угла  $\theta$  и двух направлений силовых линий магнитного поля  $B_{NS}$  и  $B_{SN}$  (противоположно направленным).

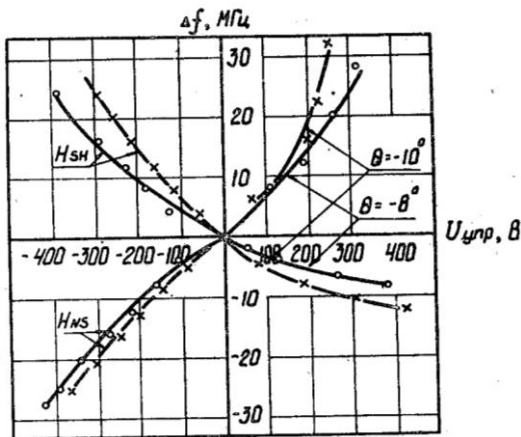


Рис. 3. Зависимость изменения частоты автоколебаний ЛОВО  $\Delta f$  от потенциала на управляющем электроде для случая прохождения электронного потока параллельно поверхности замедляющей системы ( $\varphi = 0$ )

Видно, что в этом случае изменение направления силовых линий индукции магнитного поля с  $B_{NS}$  на  $B_{SN}$ , изменяющее направление дрейфа электронного потока в плоскости гребенки ( $X = 0$ ), при постоянном его абсолютном значении меняет знак крутизны характеристик управления частотой выходного сигнала, что качественно соответствует изменению второго слагаемого выражения (9). Абсолютное значение крутизны характеристик управления частотой выходного сигнала ЛОВО-клинотрона, как видно из рис. 3, определяется значением угла влета  $\theta$  электронного потока в пространство взаимодействия и растет с ростом угла  $|\theta|$ .

Анализ приведенных зависимостей показывает, что для заданной конструкции ЛОВО ( $b = \text{const}$ ) средняя крутизна характеристик управления частотой автоколебаний зависит от изменения начального угла влета  $\theta$  электронного потока в пространство взаимодействия или угла нарезки замедляющей системы. Наряду с качественным соответствием экспериментальных результатов расчетным видно, что крутизна харак-

теристик управления частотой автоколебаний не постоянная, а меняется в диапазоне перестройки, т. е. имеет место нарушение линейности этих характеристик. Линейный диапазон перестройки не превышает нескольких десятых долей процента от основной частоты.

Одной из характерных особенностей такого способа управления частотой клинотрона является слабое изменение генерируемой мощности в полосе перестройки. Для примера на рис. 4 приведены зависимости изменения частоты и генерируемой мощности от величины управляющего напряжения для четырех значений угла  $\theta$ . Видно, что перепад мощности в полосе перестройки не превышает 3 дБ. Из факторов, влияющих на диапазон характеристик к границам области перестройки, в первую очередь, следует отнести проявление влияния электродинамики резонансной периодической системы.

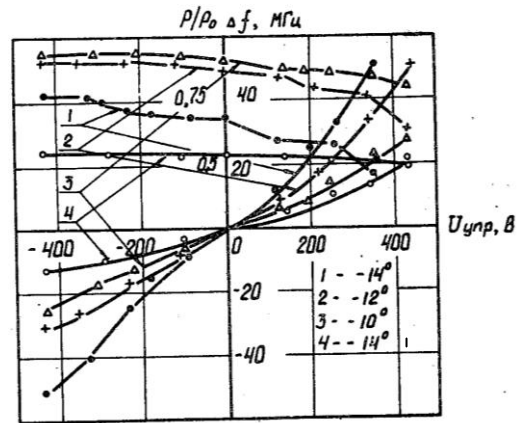


Рис. 4. Зависимость изменения частоты автоколебаний  $\Delta f$  и мощности выходного сигнала ЛОВО-клинотрона от потенциала на управляющем электроде  $U_{упр}$

Так как в эксперименте применялась резонансная ЛОВО-клинотрон, то дисперсия ее замедляющей системы представляет собой ряд прерывистых резонансных зон (рис. 2). В результате этого диапазон перестройки ограничивается шириной резонансной зоны и при изменении потенциала на управляющем электроде частота может меняться скачком, т. е. происходит перескок на следующую резонансную зону.

При работе макета вблизи границ резонансной зоны, где имеет место нарушение линейности дисперсионной зависимости, т. е. нарушение соотношения (4), происходит нарушение линейности характеристик управления частотой. Наряду с этим, неравномерность распределения мощности в пределах резонансной зоны приводит к перепаду мощности в диапазоне перестройки.

**Выводы.** Таким образом, показано расчетом и подтверждено экспериментально, что использование в ЛОВО-клинотроне в качестве

замедляющей системы косой гребенки позволяет осуществить безынерционное управление частотой автоколебаний. В отличие от существующих в миллиметровом диапазоне способов управления частотой автоколебаний предложенный способ не требует затраты мощности в цепи управления и не исключает возможности управления частотой автоколебаний за счет изменения ускоряющего напряжения или плотности тока в потоке.

Крутизну характеристик управления частотой автоколебаний при заданном угле нарезки косой гребенки можно регулировать расстоянием между поверхностями управляющего электрода и замедляющей системы, а также изменением угла влета электронного потока в пространство взаимодействия или за счет изменения направления силовых линий индукции магнитного поля.

Экспериментальные результаты качественно согласуются с расчетом. Частотный диапазон перестройки в эксперименте составляет  $(0,1 \pm 0,3)\%$ . При этом перепад мощности выходного сигнала не превышает 3 дБ.

1. А.с. 34113 СССР, МКИ Лампа обратной волны / Г. Я. Левин // Открытия. Изобретения. - 1972. - № 18. - 201 с.
2. Альтицлер Ю. Г., Татаренко А. С. Лампы малой мощности с обратной волной. - М: Сов. радио, 1963. - 296 с.
3. А.с. 55751 СССР. Лампа обратной волны / Еремка В. Д., Кириченко А. Я., Солодовник В. А. // Открытия. Изобретения. - 1972. - № 44. - 227 с.
4. Силин Р. А., Сазонов В. П. Замедляющие системы. - М.: Сов. радио, 1966. - 632 с.
5. Еремка В. Д., Кириченко А. Я., Солодовник В. А. О возбуждении косой гребенки электронным потоком // Известия вузов. Радиофизика. - 1977. - 20, №10. - С.1580-1582.
6. Солодовник В. А. Исследование особенностей бестокового управления частотой автоколебаний лампы обратной вол-

ны с косой гребенкой. - Харьков, 1981. - 36 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электрон. - №168).

## CURRENTLESS OPERATING OF A CLYNOTRON FREQUENCY WITH OBLIQUE PERIODIC SYSTEM

V. A. Solodovnik

Features of a new way of management by frequency of self-oscillations of klynotron with the help of the special electrode located in space of interaction of an electronic stream with fields of periodic structure are investigated. Prominent feature of this way is fast management of frequency of a target signal without appreciable expenses of capacity in a circuit of management. It is proved, that as slowing down system such way should use flat slanting periodic structures. The opportunity of management by a steepness of modulation characteristics is shown.

**Key words:** HF, backward-wave tube, electron optical system.

## БЕСТОКОВЕ КЕРУВАННЯ ЧАСТОТОЮ КЛІНОТРОНУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ КОСУ ГРЕБІНКУ

В. А. Солодовник

Досліджено особливості нового способу керування частотою автоколивань кліноотрона за допомогою спеціального електрода, який розміщено в просторі взаємодії електронного потоку з електромагнітними полями періодичної структури. Характерною особливістю цього способу є швидке управління частотою сигналу на виході генератора без помітних втрат потужності в ланцюзі управління. Доказано, що як сповільнюючу систему такий спосіб повинен використовувати плоскі косі періодичні структури. Показана можливість управління крутизною модуляційної характеристики.

**Ключові слова:** НВЧ, лампа зворотної хвилі, електронно-оптична система.

*Рукопись поступила 7 декабря 2006 г.*