

## ЛАМПА ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

В задаче изучается лампа с обратной волной в режиме генерации (ЛОВ-генератор). ЛОВ-генераторы широко используются в качестве СВЧ-генераторов преимущественно малой и средней мощности в дециметровом, сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Отличительной особенностью ЛОВ - генераторов является возможность безинерционной перестройки рабочей частоты в широкой полосе - порядка октавы и более.

В процессе выполнения задачи изучается принцип действия ЛОВ и ее основные характеристики - диапазон электрической перестройки, амплитудно-частотная зависимость, пусковые токи и т.д.

### 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛОВ

В отличие от СВЧ-триодов и клистронов существует класс приборов СВЧ, основанных на длительном взаимодействии потока электронов с полем бегущей электромагнитной волны. Среди них наибольшее распространение получили лампы с бегущей волной (ЛБВ) и лампы с обратной волной (ЛОВ). Схемы этих приборов изображены на рис.1 (здесь 1 - электронная пушка, 2 - замедляющая система, 3 - коллектор, 4 - согласователь).

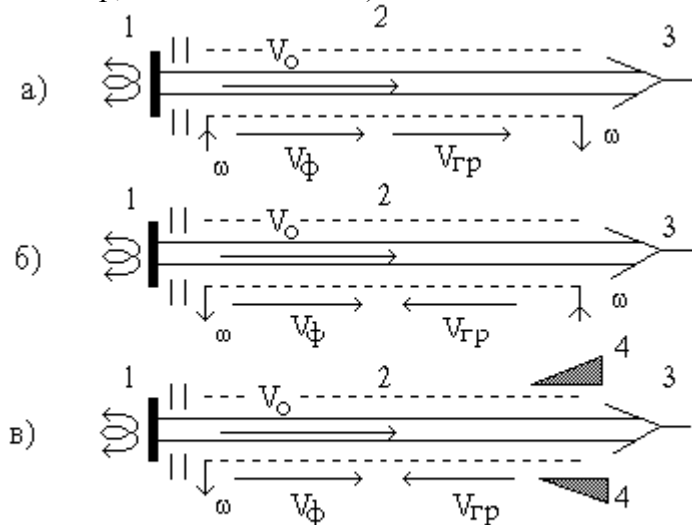


Рис.1 Принципиальные схемы ЛОВ и ЛБВ.

этой волны в течение нескольких десятков или даже сотен периодов СВЧ колебаний. На первом этапе волны модулируют поток по скорости, затем эта модуляция перерастает в модуляцию по плотности, т.е. происходит образование электронных сгустков. При определенных условиях эти сгустки локализуются преимущественно в тормозящих полупериодах поля волны, отдают часть энергии своего продольного движения и, следовательно, приводят к усилению или генерации сигнала.

В замедляющих системах могут распространяться электромагнитные волны, имеющие как одинаково-, так и противоположно- направленные фазовую и групповую скорости (раздел 2). Первые из них используются в ЛБВ (рис.1а), последние - в ЛОВ (рис.1б, 1в).

В ЛОВ-усилителях и генераторах фазовая скорость волны в замедляющей системе направлена вдоль направления движения электронного потока; групповая -

Принцип работы усилителя (рис.1а, 1б) заключается в следующем. СВЧ - сигнал вводится в специальную замедляющую систему, конструкция которой выбрана таким образом, чтобы уменьшить фазовую скорость электромагнитной волны, распространяющейся вдоль направления движения электронного потока. Если скорость потока  $v_0$  близка к фазовой скорости волны  $v_Ф$ , электроны могут находиться в **синхронизме** и взаимодействовать с полем

навстречу ему (рис.1б, 1в). Это значит, что система **регенеративна**, т.е. содержит **положительную обратную связь**. Любая флуктуация плотности пространственного заряда в потоке будет двигаться вместе с электронным пучком со скоростью  $v_0$  и индуцировать в замедляющей системе переменное высокочастотное напряжение, которое распространяется по замедляющей системе уже навстречу электронному потоку, в свою очередь воздействуя на него. Электронный пучок выполняет здесь двойную роль - является источником энергии и цепью, по которой осуществляется обратная связь.

ЛОВ-усилители обычно узкополосны, но перестраиваются в широком диапазоне частот путем изменения потенциала замедляющей системы. Они могут использоваться в качестве входного усилителя-фильтра с целью увеличения помехозащищенности радиоприемных систем.

При увеличении регенерации (например, с ростом тока пучка) ЛОВ-усилитель превращается в ЛОВ-генератор. Генерируемая частота определяется условиями синхронизма, а диапазон электрической перестройки - областью прозрачности замедляющей системы для рабочего компонента волны.

## 2. ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ГАРМОНИКИ

Замедляющие системы, используемые в ЛОВ и ЛБВ, служат для уменьшения фазовой скорости компонента электромагнитной волны, распространяющейся вдоль направления движения электронного потока ( $|v/c| \ll 1$ ,  $c = 3 \times 10^8$  м/сек - скорость света в вакууме). Вне зависимости от конкретной конструкции, все они периодичны в пространстве по направлению вдоль электронного потока.

Любую величину, характеризующую поле волны, распространяющейся вдоль положительного направления оси  $Z$  с фазовой скоростью  $v_\phi$  на частоте  $\omega$  можно представить в виде:

$$A(x, y, z, t) = A_0(x, y, z) e^{j(\omega t - \beta_0 z)}, \quad \beta_0 = \frac{\omega}{v_\phi}. \quad (1)$$

В силу периодичности системы вдоль оси  $Z$ , функция  $A(x, y, z)$  должна быть периодичной по  $Z$  с периодом, равным периоду системы  $D$ . Если теперь разложить  $A(x, y, z)$  в ряд Фурье по пространственной координате  $Z$ , то величину  $A(x, y, z, t)$  можно представить в виде суммы пространственных гармоник

$$A(x, y, z, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(x, y) e^{j(\omega t - \beta_n z)}, \quad (2)$$

где  $\beta_n = \beta_0 + 2\pi n/D$  - постоянная распространения пространственной гармоники с номером  $n$ ,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ,

$$A_n(x, y) = \frac{1}{D} \int_0^D A_0(x, y, z) e^{j2\pi \frac{n}{D} z} dz. \quad (3)$$

В любой периодической структуре существует, таким образом, бесконечное число пространственных гармоник с различными фазовыми скоростями  $v_{\phi n}$ , но с единой групповой скоростью  $v_{Гр}$ :

$$v_{\phi n} = \frac{\omega}{\beta_n}, \quad v_{гр} = \frac{d\omega}{d\beta_n} = \frac{d\omega}{d\beta_0}, \quad (4)$$

Пространственные гармоники, для которых  $\beta_n > 0$ , имеют однонаправленные фазовую и групповую скорости и называются прямыми пространственными гармониками. И наоборот - пространственные гармоники, для которых  $\beta_n < 0$ , носят название обратных и имеют противоположно-направленные фазовую и групповую скорости.

Следует существенно отличать пространственные гармоники от временных и от различных типов волн, возможных в волноведущих системах с гладкими ограничивающими поверхностями. Как временные гармоники, так и различные типы волн в волноводах могут возбуждаться и существовать независимо, в то время как пространственные гармоники являются компонентами единой сложной волны и только их сумма удовлетворяет граничным условиям на поверхности периодической замедляющей системы.

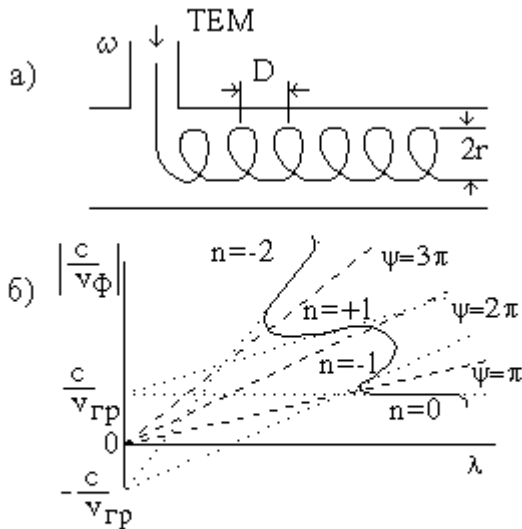


Рис.2 Замедляющая система в виде круглой спирали.

Важной характеристикой замедляющих систем является дисперсионная характеристика, т.е. зависимость  $v_{\phi n}(\omega)$ , которую часто представляют в виде зависимости коэффициента замедления  $c/v_{\phi n}$  от длины волны  $\lambda$ . Из (2) можно записать:

$$\frac{c}{v_{\phi n}} = \frac{\lambda}{2\pi D} (\psi(\lambda) + 2\pi n), \quad (5)$$

где  $\psi(\lambda) = \beta_0(\lambda)D$  - изменение фазового угла на длине периода системы для основной пространственной гармоники. На рис.2а приведены типичные дисперсионные характеристики, построенные в координатах  $c/v_{\phi n} =$

$f(\lambda)$ . Групповая скорость для всех пространственных гармоник одинакова и может быть определена по отрезку, отсекаемому на оси ординат касательной к дисперсионной кривой в данной точке.

Эффективность взаимодействия той или иной пространственной гармоники с электронным пучком принято характеризовать сопротивлением связи:

$$R_n = \frac{1}{S_0} \frac{|E_{zn}|^2 dS}{2\beta_n^2 P}, \quad (6)$$

Здесь  $S_0$  - площадь поперечного сечения электронного потока,  $E_{zn}$  - пространственная гармоника напряженности высокочастотного электрического поля, направленного вдоль электронного потока,  $P$  - суммарный поток мощности через поперечное сечение замедляющей системы.

Исторически первой появилась замедляющая система в виде круглой спирали (рис.2а). На рис 2.б приведены ее типичные дисперсионные характеристики. Сопротивление связи спиральной замедляющей системы максимально для нулевой пространственной гармоники, поэтому она находит широкое применение в ЛБВ. И хотя обратные пространственные гармоники здесь также присутствуют, сопротивление связи для них значительно ниже. Поэтому в ЛОВ-усилителях и ЛОВ-генераторах используют обычно более сложные замедляющие системы (типа двухзаходной спирали, "встречных штырей" (рис.3а), "встречных петель" (рис.4а) и др.), для которых основной пространственной гармоникой является гармоника с  $n=-1$ .

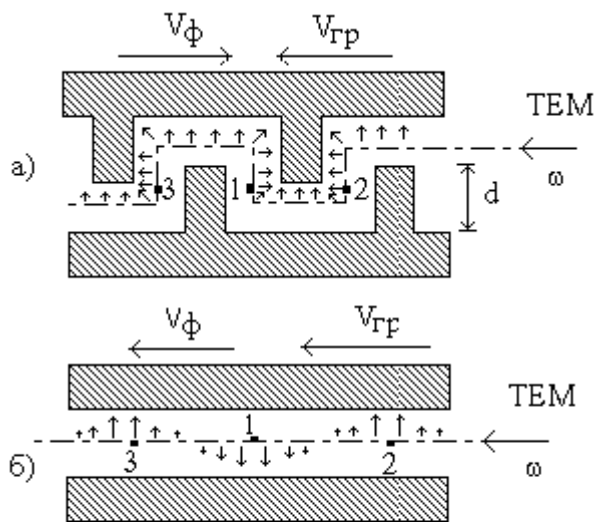


Рис.3 Мгновенное распределение напряженности в з.с. "встречные штыри" (а) и двухпроводной линии (б).

Замедляющая система "встречные штыри" (рис.3а) в первом приближении может быть рассмотрена как деформированный вариант двухпроводной линии (рис.3б). Качественно можно убедиться, что для волны, распространяющейся вдоль оси  $OO'$  на рис.3а, т.е. в области локализации электронного пучка, групповая и фазовая скорости противоположны друг другу. Пусть в обоих случаях (рис.3а и 3б) источник электромагнитного излучения (**ТЕМ**-волна) находится справа и, следовательно, справа налево направлены групповые скорости волн. В фиксированный момент времени выделим область с нулевым значением вектора напряженности электрического поля на оси системы (1 на рис.3а и 3б), а затем

проследим фазу поля в этой области в последующие моменты времени.

В двухпроводной линии направление вектора напряженности электрического поля станет отрицательным - примет значение, которое ранее было в области 2, т.е. перемещение фазы происходит справа налево и, следовательно, в этом случае фазовая скорость волны совпадает по направлению с групповой.

Для замедляющей системы "встречные штыри" ситуация иная. Через интервал времени  $\Delta t = (D/2+d)/c$ , необходимый для перемещения волны из области 2 в 1, направление вектора напряженности электрического поля в области 1 станет таким, каким оно было в исходный момент времени в области 3. Это соответствует перемещению фазы поля вдоль оси  $OO'$  слева направо, т.е. направление фазовой скорости противоположно групповой.

Напряженность электрического поля  $E_{z,-1}$  быстро падает по величине при удалении от поверхности замедляющих систем, поэтому на практике для увеличения сопротивления связи часто используют полые цилиндрические, либо ленточные электронные пучки. Так, например, в процессе выполнения упражнений задачи изучается ЛОВ-генератор с замедляющей системой типа "встречные петли" (рис.4а), которая является, по существу, конструктивной модификацией "встречных штырей" и позволяет использовать систему трех ленточных электронных потоков (рис.4б).

Строгий расчет сопротивления связи и дисперсионных характеристик замедляющих систем основывается на решении волнового уравнения с граничными условиями, соответствующими конфигурации проводящих поверхностей замедляющей системы в каждом конкретном случае.

### 3. ЭЛЕКТРОНИКА ЛОВ.

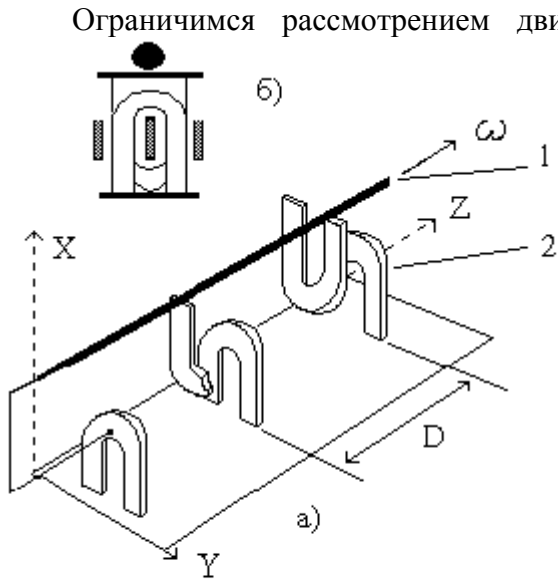


Рис.4 а)З.с. типа "встречные петли"  
(1-трансформатор импедансов,2-петля);  
б)Положение электронных пучков.

Ограничимся рассмотрением движения электронного потока в простейшем одномерном случае, когда все основные векторные величины (скорости отдельных электронов, сила кулоновского взаимодействия, внешнее электрическое поле и т.д.) направлены вдоль оси  $z$  и не зависят от поперечных координат. Физически это больше всего соответствует случаю, когда равномерно заряженный по сечению электронный пучок помещен во внешнее постоянное и однородное магнитное поле, ориентированное вдоль оси  $z$ . Причем величина его настолько велика, что любыми поперечными движениями в потоке можно пренебречь.

Тогда уравнение движения и уравнение непрерывности приобретают вид:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-eE}{m} \quad , \quad (7)$$

$$\frac{\partial J}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad , \quad (8)$$

где  $v(z,t)$  - скорость электронов в пучке,  $e \approx 1,6 \times 10^{-19}$  кул - заряд электрона,  $m = 9,11 \times 10^{-31}$  кг - масса электрона,  $E$  - напряженность электрического поля;  $J(z,t)$ ,  $\rho(z,t)$  - соответственно плотность тока и плотность пространственного заряда, причем

$$J(z,t) = v(z,t) \rho(z,t) \quad , \quad (9)$$

$$I(z,t) = S_0 J(z,t) \quad , \quad (10)$$

десь  $I$ ,  $S_0$  - ток и площадь поперечного сечения электронного пучка.

В малосигнальном приближении величины  $v$ ,  $\rho$ ,  $J$ ,  $I$  могут быть представлены в виде постоянных и малых переменных составляющих:

$$\begin{aligned} v(z,t) &\approx v_0 + v_1(z) e^{j\omega t} \quad , \quad \rho(z,t) \approx \rho_0 + \rho_1(z) e^{j\omega t} \quad , \\ J(z,t) &\approx J_0 + J_1(z) e^{j\omega t} \quad , \quad I(z,t) \approx I_0 + I_1(z) e^{j\omega t} \quad , \\ E(z,t) &\approx E_1(z) e^{j\omega t} \quad , \end{aligned} \quad (11)$$

причем

$$\left| v_0 \right| \gg \left| v_1 \right|, \left| \rho_0 \right| \gg \left| \rho_1 \right|, \left| J_0 \right| \gg \left| J_1 \right|, \left| I_0 \right| \gg \left| I_1 \right| \quad , \quad (12)$$

Отбрасывая произведения второго порядка малости, из (7)-(9) получим:

$$\frac{\partial(v_0 v_1)}{\partial z} + j\omega v_1 = \frac{-eE_1}{m} \quad (13)$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial z} + j\omega \rho_1 = 0 \quad (14)$$

$$J_1 = v_1 \rho_0 + v_0 \rho_1 \quad (15)$$

Амплитуда напряженности электрического поля  $E_1$ , входящая в уравнение (13), включает в себя как поле кулоновских сил рассталкивания  $E_{1k}$ , так и продольную составляющую высокочастотного электрического поля  $E_{1BH}$ , наложенного извне на пучок

$$E_1 = E_{1k} + E_{1BH} \quad (16)$$

Для одномерной модели амплитуда высокочастотной составляющей напряженности магнитного поля не зависит от поперечных координат  $x, y$  и, следовательно,

$$-J_1 + j\varepsilon_0 \omega E_{1k} = 0 \quad (17)$$

Из (13,17) находим:

$$\left(\frac{d}{dz} + j\beta_e\right)V_1 = j\frac{J_0}{\varepsilon_0 \omega I_0} I_1 - E_{1BH} \quad (18)$$

$$\left(\frac{d}{dz} + j\beta_e\right)I_1 = j\beta_e \frac{I_0}{2V_0} V_1 \quad (19)$$

где  $\beta_e = \omega/v_0$  - электронная постоянная распространения,  
 $V_1 = mv_0 v_1 / e$  - кинетический потенциал пучка,  
 $V_0 = mv_0 v_0 / 2e$  - потенциал потока, соответствующий скорости  $v$ .

### 1. Собственные колебания в электронном потоке.

При отсутствии внешних полей ( $E_{1BH} \equiv 0$ ) система (17-19) замкнута и из нее следует, что в дрейфующем пучке любая модуляция по скорости неизбежно приводит к модуляции тока, т.е. к образованию пространственных уплотнений - сгустков. И, наоборот, - модуляция по плотности вызывает модуляцию по скорости. Этот колебательный механизм порожден кулоновским взаимодействием в пучке. Величины  $V_1$ ,  $I_1$  здесь однозначно связаны. Естественнее описывать электронный поток в терминах таких переменных, которые преобразуют систему (17-19) в два независимых дифференциальных уравнения, когда  $E_{1BH} = 0$ . Физически это эквивалентно выделению собственных, нормальных колебаний в свободно дрейфующем электронном пучке.

Из (17-19) находим:

$$\left(\frac{d}{dz} + j(\beta_e - \beta_\rho)\right)a_+ = 0 \quad (20a)$$

$$\left(\frac{d}{dz} + j(\beta_e + \beta_\rho)\right)a_- = 0 \quad (20b)$$

где

$$\mathbf{a}_{\pm} = \frac{1}{2\sqrt{2Z_n}} (\mathbf{V}_1 \pm Z_1 \mathbf{I}_1) , \quad (21a)$$

$$\beta_{\rho} = \frac{\omega_{\rho}}{v_0} , \quad Z_n = \frac{2V_0 \omega_{\rho}}{I_0 \omega} , \quad (21b)$$

$\omega_{\rho} = (\epsilon \rho_0 / \epsilon_0 m)$  - плазменная частота, т.е. частота собственных колебаний неограниченной по объему плазмы с однородной плотностью.

Решение(20-21) имеет вид двух бегущих волн:

$$\mathbf{a}_{\pm} = \mathbf{a}_0_{\pm} e^{j(\beta_e \pm \beta_{\rho})z} , \quad \mathbf{a}_0_{\pm} = \text{const}_{\pm} , \quad (22)$$

(временной множитель  $e^{j\omega t}$  опущен ранее), с различными фазовыми скоростями

$$v_{\phi \pm} = -v_0 \left(1 \pm \frac{\omega_{\rho}}{\omega}\right)^{-1} , \quad (23)$$

но с единой групповой скоростью  $v_{Гр\pm} \equiv v_0$ .

Каждая из этих волн может существовать независимо друг от друга и, наоборот, распространение любого возмущения в дрейфующем потоке может быть описано комбинацией из этих волн. Волна  $a_+$  носит название быстрой волны пространственного заряда ( $v_{\phi+} > v_0$ ), волна  $a_-$  - медленной волны простран-ственного заряда ( $v_{\phi-} < v_0$ ).

Для быстрой волны  $V_1$  и  $I_1$  находятся в фазе (см.21) и, следовательно, максимум скорости совпадает с максимумом плотности тока, т.е. в пучке преобладают электроны со скоростью большей, чем  $v_0$ . Для медленной волны  $V_1$ ,  $I_1$  - противофазны и преобладают электроны, скорость которых меньше  $v_0$ . Процесс усиления электромагнитной волны, при взаимодействии ее с электронным потоком, связан всегда с передачей части энергии продольного движения пучка волне, т.е. с торможением электронов и, следовательно, с нарастанием медленной волны пространственного заряда. И, наоборот, нарастание быстрой волны соответствует ускорению электронов, т.е. поглощению энергии электромагнитной волны.

Конечные поперечные размеры пучка, наличие вблизи него металлических поверхностей (труба дрейфа, замедляющая система и др.) в первом приближении не изменяют общей картины распространения нормальных волн в потоке и могут быть учтены заменой  $\omega_{\rho}$  на так называемую редуцированную плазменную частоту  $\omega_q$ , причем  $\omega = R$ ,  $RV_1$  - коэффициент редукиции. На этом основании мы везде в уравнениях далее заменим формально  $\omega_{\rho}$  на  $\omega_q$ ;  $\beta_{\rho}$  на  $\beta_q = \omega_q / v_0$ .

## 2. Взаимодействие с замедляющей системой.

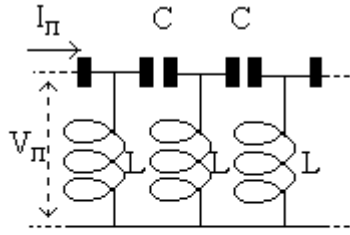


Рис.5 Фильтр верхних частот

В пределах сделанных допущений, свободно дрейфующий электронный поток подобен некоторой линии передач, по которой могут распространяться волны  $a_+$  и  $a_-$ . В свою очередь замедляющая система для  $n=-1$  пространственной гармоники также может быть представлена линией передачи, в том числе, в виде простейшего фильтра верхних частот (рис.5).

Задачу о взаимодействии электронного потока с электрическим полем замедляющей системы можно свести, таким образом, к задаче о взаимодействии двух линий передачи, связанных между собой (рис.6).

В этом случае в уравнения (17-19) должно быть введено внешнее электрическое поле, действующее со стороны линии на пучок:

$$E_{1вн} = -\frac{dV_{Л}}{dz}, \quad (24)$$

тогда, подобно (20), получим:

$$\left(\frac{d}{dz} - j(\beta_e \pm \beta_q)\right)a_{\pm} = \frac{1}{2\sqrt{2Z_n}} \frac{dV_{Л}}{dz}, \quad (25)$$

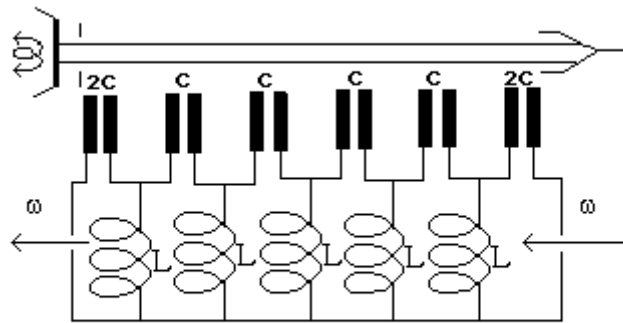


Рис.6 Эквивалентная схема ЛОВ.

А в уравнение (7) необходимо добавить ток, наводимый пучком в линии:

$$\frac{dV_{Л}}{dz} = j\frac{1}{\omega C} I_{Л}, \quad \frac{dI_{Л}}{dz} = j\frac{1}{\omega L} V_{Л} - \frac{d(-I_1)}{dz}, \quad (26)$$

Обозначая  $Z_{Л} = (L/C)^{1/2}$  и

$$A_{\pm} = \frac{1}{2\sqrt{2Z_{Л}}} (V_{Л} \pm Z_{Л} I_{Л}), \quad (27)$$

из (26) находим:

$$\left(\frac{d}{dz} \pm (-j\beta_{Л})\right)A_{\pm} = \frac{\pm 1}{2\sqrt{2}} \sqrt{Z_{Л}} \frac{dI_1}{dz}, \quad (28)$$

где  $\beta_{Л} = 1/(\omega(LC)^{1/2})$ .

Если связь с электронным потоком отсутствует



$$\frac{dI_1}{dz} = 0 \quad , \quad (29)$$

решение системы (27) имеет вид двух бегущих волн с постоянными амплитудами:

$$A_{\pm} = A_{0\pm} e^{\pm j\beta_L z} \quad , \quad A_{0\pm} = \text{const}_{\pm} \quad , \quad (30)$$

которые называются собственными или нормальными волнами линии. Для каждой из них фазовая и групповая скорости направлены противоположно друг другу, а  $|A_{\pm}|^2 = 1/2 \text{Re}(I_L V_L)$  - есть средняя мощность, переносимая той или иной волной вдоль линии.

Используя (21), (27) и заменяя  $V_L$  и  $I_1$  в (25), (28) через  $A_{\pm}$ ,  $a_{\pm}$ , получим систему дифференциальных уравнений для четырех связанных волн:

$$\left(\frac{d}{dz} - j(\beta_e \pm \beta_q)\right)a_{\pm} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_L}{Z_n}} \frac{d}{dz} (A_+ + A_-) \quad , \quad (31)$$

$$\left(\frac{d}{dz} \pm (-j\beta_L)\right)A_{\pm} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_L}{Z_n}} \frac{d}{dz} (a_+ - a_-) \quad . \quad (32)$$

В реальных конструкциях ЛОВ-усилителей и ЛОВ-генераторов длина области взаимодействия пучка с полем электродинамической системы обычно составляет несколько так называемых замедленных длин волн  $\Lambda$ :

$$\Lambda = \lambda \left| \frac{v_{\Phi, -1}}{c} \right| \quad , \quad \lambda = \frac{2\pi c}{\omega} \quad , \quad (33)$$

а относительное изменение модулей амплитуд волн  $A_{\pm}$ ,  $a_{\pm}$  мало на длине  $\Lambda$ . Это соответствует случаю слабой связи между волнами пучка и системы. Правая часть уравнений (31-32) носит при этом характер малого возмущения:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_L}{Z_n}} \ll 1 \quad (34)$$

по отношению к основным колебательным процессам, описываемым левыми частями этой системы.

Условие (34) позволяет в правых частях системы уравнений (31-32) ограничиться членами первого порядка малости, т.е. отбросить слабо связанные волны и, кроме того, приближенно считать:

$$\frac{d}{dz} A_{-} \approx -j\beta_e A_{-} \quad , \quad \frac{d}{dz} a_{-} \approx -j\beta_e a_{-} \quad , \quad (35)$$

$$\beta_e \approx \beta_L \quad , \quad \beta_q \ll \beta_e \quad , \quad (36)$$

С учетом этих замечаний из (31-32) получим

$$\left(\frac{d}{dz} + j(\beta_e + \beta_q)\right)a_{-} = -j \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_L}{Z_n}} \frac{d}{dz} \beta_e A_{-} \quad , \quad (37)$$

$$\left(\frac{d}{dz} \pm (-j\beta_L)\right)A_{-} = -j \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_L}{Z_n}} \frac{d}{dz} \beta_e a_{-} \quad . \quad (38)$$

Интегрирование такой системы уравнений уже не вызывает трудностей и должно быть выполнено при следующих граничных условиях

$$a_{-}(0) = 0, \quad A(1) = A_0, \quad (39 - 40)$$

где  $A_0$  - входное значение амплитуды волны в линии,  $l$  - длина области взаимодействия.

Результат интегрирования для квадрата модуля амплитуды волны в линии имеет вид:

$$|A_{-}(z)|^2 = \frac{1 - F \sin^2 kz}{1 - F \sin^2 kl} |A_0|^2, \quad (41)$$

где

$$F = (1 + (\beta_{+} + \beta_{q} - \beta_{l}) \frac{2V_0 \beta_q}{I_0 Z_l \beta_q})^{-1}, \quad (42)$$

$$k = \frac{1}{2} ((\beta_e + \beta_q - \beta_l)^2 + \frac{I_0 Z_l \beta_e^3}{2V_0 \beta_q})^{1/2}. \quad (43)$$

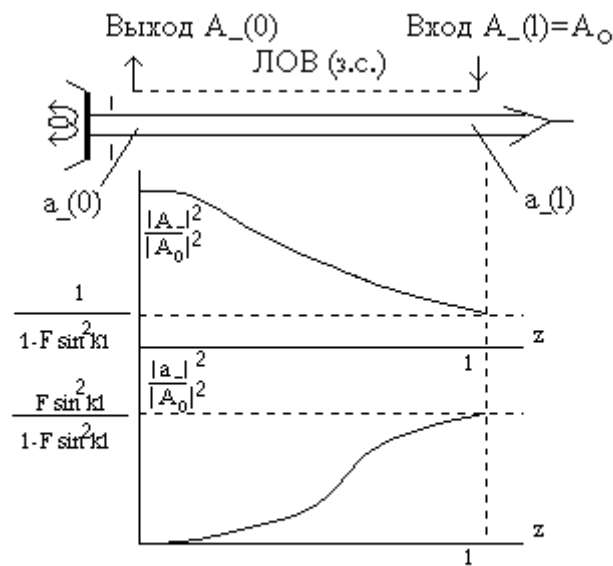


Рис.7 Распределение квадратов модулей амплитуд волн вдоль оси ЛОВ.

Распределение квадратов модулей амплитуд волн в потоке и в замедляющей системе изображено на рис.7.

Коэффициент усиления ЛОВ из (41) соответственно равен:

$$G = \frac{|A_{-}(0)|^2}{|A_{-}(1)|^2} = \frac{1}{1 - F \sin^2 kl}. \quad (44)$$

Если одновременно

$$F = 1 \quad \text{и} \quad kl = \pi/2(2s - 1), \quad s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (45)$$

то  $G \rightarrow \infty$ , т.е. ЛОВ-усилитель превращается в ЛОВ-генератор. Условие  $F=1$  выполняется только в том случае, когда:

$$\beta_{\text{л}} \equiv \beta_{\text{е}} + \beta_{\text{q}} \quad , \quad (46)$$

т.е. генерация всегда возникает на частоте, при которой фазовая скорость волны в замедляющей системе точно равна фазовой скорости медленной волны пространственного заряда:

$$v_{\text{ф}, -1}(\omega) \equiv v_0 \left(1 + \frac{\omega}{v_0} \frac{q}{\omega}\right)^{-1} \quad , \quad (47)$$

Здесь  $v = (2eV_0 / m)^{1/2}$ ,  $v$  (см/сек) =  $5,95 \times 10^7 (V \text{ (вольт)})^{1/2}$ ,  $V_0$  напряжение замедляющей системы.

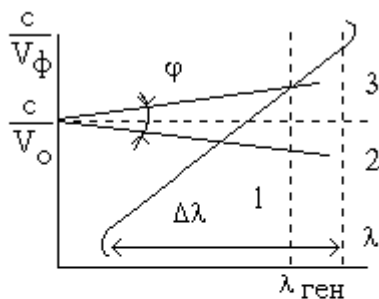


Рис.8 Дисперсионная характеристика ( $n=-1$ ) пространственной гармоники з.с.

Электрическая перестройка частоты генерации ЛОВ осуществляется обычно изменением потенциала замедляющей системы  $V$ . На рис.8 это соответствует перемещению точки  $c/v_0$  вдоль оси ординат с соответствующим изменением  $\lambda_{\text{ген}}$ . При изменении тока пучка  $I_0$  изменяется плазменная частота  $\omega_q$ , т.е. угол  $\varphi$  на рис.8, но это обычно приводит лишь к сравнительно небольшим изменениям  $\lambda_{\text{ген}}$ .

Второе условие (46) при  $s=0$  позволяет определить значение пускового тока, т.е. минимального тока, при котором возникает генерация. Из (44-45):

$$\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 = \frac{Z_{\text{л}} I_{0\text{пуск}} \omega^3}{4(e/m)V_0^2 \omega_{\text{пуск}}^2} \quad ,$$

причем плазменная частота тоже зависит от тока луча:

$$\omega_{\text{q}} = R\omega_{\rho} = \gamma \frac{\sqrt{I_0}}{4\sqrt{V_0}} \quad , \quad (49)$$

где  $\gamma$  -коэффициент, связанный с конкретной конструкцией прибора (коэффициент редукции, площадь поперечного сечения пучка и т.д. (см.(53))).

Из (48-49):

$$I_{0\text{пуск}} = \gamma^2 \frac{(e/m)^2 \lambda^6 V_0^{1/2}}{4\pi^2 c^6 Z_{\text{л}}^2 l^4} \quad . \quad (50)$$

Пусковой ток, таким образом, резко падает при увеличении длины замедляющей системы и величины сопротивления связи, которое в данном анализе совпадает с  $Z_{\text{л}}$ .

Линейная теория не в состоянии описать амплитудную характеристику ЛОВ-генератора. Ограничение амплитуды колебаний в генераторе всегда связано с проявлением нелинейности его характеристик. Качественно можно указать два основных механизма, вызывающих ограничение амплитуды колебаний в ЛОВ-генераторе.

С ростом амплитуды сигнала все большая энергия отбирается от потока и, следовательно, все сильнее тормозится электронный пучок, постепенно выбывая из синхронизма с полем замедляющей системы. С другой стороны, при больших амплитудах нарастание плотности сгустков в электронном потоке начинает ограничиваться расталкивающим действием кулоновских сил.

Оба эти механизма не учтены в использованной здесь линейной теории, т.к. расстройка ( $\beta_e + \beta_q - \beta_d$ ) считалась неизменной вдоль оси  $z$ , а на степень модуляции потока наложены ограничения (12). Наличие отраженных волн в замедляющей системе вызывает появление стоячих волн и, следовательно, связано с периодическим чередованием минимумов и максимумов напряжения на выходном конце замедляющей системы ( $z=0$ ), т.е. приводит к "волнистости", изрезанности амплитудно-частотной характеристики ЛОВ-генератора.

#### 4. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

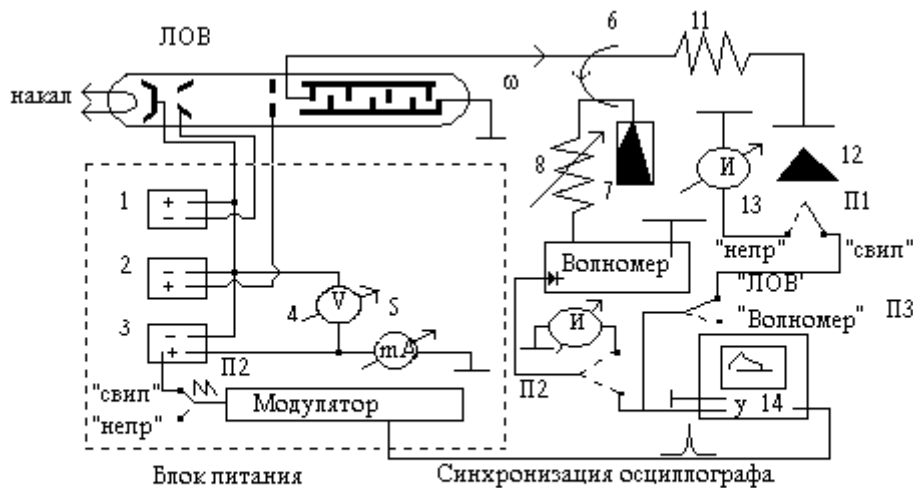


Рис.9 Блок-схема экспериментальной установки.

Установка (рис.9) состоит из: исследуемой ЛОВ, системы стабилизированных выпрямителей (1-3), модулятора, вольтметра (4) и миллиамперметра (5) для регистрации потенциала и тока пучка в области взаимодействия, коаксиального направленного ответвителя (6), согласованной нагрузки (7), переменного аттенюатора (8), резонансного волномера (9) со встроенным стрелочным индикатором (10), постоянного аттенюатора (11), коаксиальной детекторной головки (12), работающей в квадратичном режиме, стрелочного индикатора мощности (13), осциллографического индикатора (14) и переключателей П<sub>1</sub> - П<sub>3</sub>.

В "непрерывном" режиме (упр. 1, 2) с блока питания на электроды исследуемой ЛОВ подаются постоянные стабилизированные напряжения. Блок питания позволяет регистрировать и регулировать ток электронного потока (путем изменения напряжения на первом аноде ЛОВ) и напряжение замедляющей системы. Контроль генерируемой мощности в этом режиме осуществляется стрелочным индикатором (13). Отсчет длины волны производится по волномеру (9) при максимальном отклонении стрелочного индикатора (10).

В режиме "сви́пирование" (упражнение 3) на замедляющую систему ЛОВ поступает пилообразное напряжение с частотой 12,5 гц. Это пзволяет непосредственно в координатах мощность - длина волны наблюдать картину генерации на экране осциллографа.

## 5. ИССЛЕДУЕМЫЙ ОРАЗЕЦ ЛОВ - ГЕНЕРАТОРА

В задаче использован серийный образец ЛОВ-генератора с замедляющей системой типа "встречных петель" (рис. 4а). Электронная пушка формирует три ленточных электронных потока, один из которых пронизывает замедляющую систему внутри петель, два других -по краям (рис.4б). Это позволяет увеличить сопротивление связи пучка с замедляющей системой, пропустив весь ток электронного потока непосредственно вблизи от замедляющей системы, где напряженность продольного электрического поля наиболее высока. Дисперсионная характеристика такой замедляющей системы почти во всем рабочем диапазоне хорошо аппроксимируется линейной функцией

$$\left| \frac{c(\lambda)}{v_{\phi} - 1} \right| = 4.07 \lambda(\text{см}) - 10.74 \quad . \quad (51)$$

Для данного образца ЛОВ-генератоора:

$$\omega_q \approx 1.2 \times 10^9 \frac{\sqrt{I_0 (\text{ма})}}{\sqrt[4]{V_0 (\text{в})}} \quad , \quad (52)$$

Для фокусировки электронного потока ЛОВ-генератор помещен во внешнее однородное магнитное поле постоянного магнита.

## 6. УПРАЖНЕНИЯ

Перед выполнением упражнений внимательно ознакомьтесь с экспериментальной установкой и ее блок-схемой (рис.9), определите назначение каждого из узлов.

Детально изучите конструкцию ЛОВ-генератора, обратите внимание на способ возбуждения замедляющей системы, расположение электронных потоков и т.д.

### УПРАЖНЕНИЕ 1. ОБЛАСТЬ ПЕРЕСТРОЙКИ И КАЛИБРОВОЧНАЯ КРИВАЯ ЛОВ-ГЕНЕРАТОРА. АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА.

Поставьте переключатель режима работы на блоке питания П<sub>1</sub> и переключатель волномера П<sub>2</sub> в положение "непрерывно" и включите тумблер "сеть" на блоке питания. После 2-х минутного прогрева установка автоматически включается и загорается лампочка с надписью "подогрев".

Снимите зависимость генерируемой длины волны и мощности генерации от напряжения на замедляющей системе в пределах 220 - 700 вольт при постоянных значениях тока электронного потока: 15, 20 и 25 мА ( по указанию преподавателя).

Отсчет длины волны производите по волномеру при максимальном отклонении стрелки индикатора. Атенюатор волномера здесь и далее устанавливайте в положение, соответствующее минимальному затуханию (x1), и лишь при необходимости, когда индикатор "зашкаливает", вводите его (x2, x5 и т.д.).

Отсчет мощности генерации  $P$  (в относительных единицах) произведите по стрелочному индикатору (13) на передней панели блока питания.

Используя формулы (47, 51 и 52), постройте теоретические кривые  $\lambda(V_0)$ . При вычислениях можно считать  $\omega/\omega_q \approx 0.4$ . Нанесите экспериментальные точки, объясните полученные результаты. Постройте графики  $P(\lambda)$  и укажите наиболее вероятные причины, приводящие к изрезанности амплитудно-частотной характеристики ЛОВ-генератора.

### УПРАЖНЕНИЕ 2. ВЛИЯНИЕ ТОКА ЛУЧА НА ДЛИНУ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ВОЛНЫ.

При фиксированном напряжении на замедляющей системе 300, 400, 500 и 600 (по указанию преподавателя) вольт снимите зависимость  $\lambda(I_0)$ , изменяя ток пучка в пределах 15-25 ма.

Используя формулы (47, 51 и 52), постройте теоретические кривые. Нанесите экспериментальные точки, объясните полученные результаты.

### УПРАЖНЕНИЕ 3. ПУСКОВЫЕ ТОКИ, НАБЛЮДЕНИЕ НАЧАЛА ГЕНЕРАЦИИ.

Включите осциллографический индикатор и прогрейте его в течение 10-15 минут. Поставьте ручку "напряжение замедляющей системы" в крайнее правое по часовой стрелке положение, а ток электронного потока установите равным 10 мА. Переведите переключатель входа осциллографа  $\Pi_3$  в положение ЛОВ, а переключатель режима работы на блоке питания  $\Pi_1$  и переключатель выхода волномера  $\Pi_2$  в положение "сви́пирование" и наблюдайте в координатах  $P(\lambda)$  смещение начала генерации при изменении тока ЛОВ в пределах 6-14 мА. Совместив метку волномера на экране осциллографа с точкой начала генерации, определите по волномеру длину волны, соответствующую пусковому току.

Снимите зависимость пускового тока от длины волны  $I_{0\text{пуск}}(\lambda)$  для интервала значений токов 6 - 14 мА с шагом 0,5 мА, пользуясь для более точного определения длины волны меткой волномера, плавно подводя ее со стороны больших длин волн к области начала генерации.

Удобно (50) преобразовать к виду:

$$I_{0\text{пуск}} = \frac{\gamma^2 c (1 + \omega_q / \omega)^7}{16 \pi^2 (2 e / m)^{3/2} \lambda Z_{\text{л}}^2 l^4} \Lambda^7, \quad (56)$$

где  $\Delta = \lambda |v_{\phi, -1} / c|$  - замедленная длина волны.

В области пусковых режимов отношение  $\omega_q / \omega$  изменяется слабо, оставаясь величиной малой по сравнению с единицей. В пределах разумной для практики точности можно упростить (56), используя среднее значение  $\omega_q / \omega \approx 0,4$ .

С учетом (52-53), это дает:

$$I_{0\text{пуск}} \text{ (ма)} \approx 1.35 \times 10^4 \Lambda^7 \text{ (см)}, \quad (57)$$

Постройте теоретическую кривую, нанесите экспериментальные точки. Объясните полученные результаты.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.,Высшая школа, 1972, т.1,2.
2. Люиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике, М.,ИЛ,1963.
3. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.М. Излучение мощного электронного потока в резонансных замедляющих системах.
4. Федоров Н.Д. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы. М.,Атомиздат,1979.
5. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы. М.,Радио и связь,1981.
6. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы, М.,Сов. радио, 1966.
7. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М., Сов. радио,1973.