

ЛАМПА С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

Изучаются основные свойства лампы с бегущей волной (ЛБВ) - маломощного электроннолучевого усилителя электромагнитных колебаний сантиметрового диапазона длин волн. Задача знакомит с физикой усиления слабого сигнала и преобразования шумов в ЛБВ. Дается представление о нелинейных процессах в усилителе. Измеряются зависимости коэффициента усиления от ускоряющего потенциала и мощности входного сигнала. Определяется коэффициент шума лампы и находится минимальное значение этого коэффициента при оптимизации напряжений на электродах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Лампа с бегущей волной представляет собой широкополосный усилитель с длительным взаимодействием электронного пучка и электромагнитного поля замедляющей системы. Маломощные ЛБВ используются в приемниках СВЧ диапазона для усиления слабых сигналов, в том числе сигналов, находящихся на уровне собственных шумов усилителя.

В задаче изучаются свойства ЛБВ 10-сантиметрового диапазона длин волн малой мощности с коэффициентом усиления порядка 20-30 дБ и значительной полосой пропускания - свыше 500 МГц.

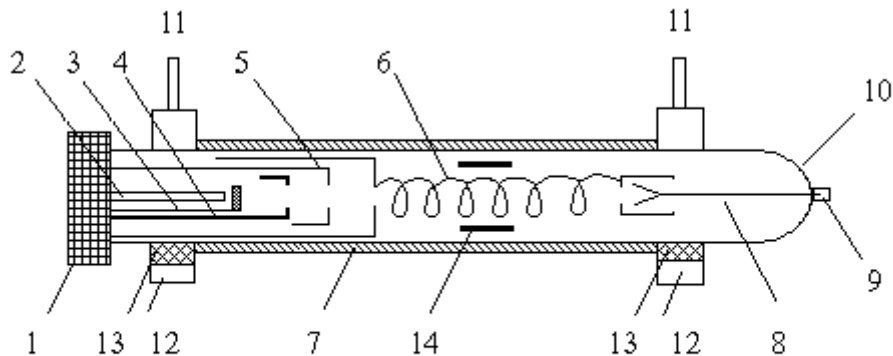


Рис.1 Конструкция ЛБВ.

Устройство ЛБВ изображено на рис. 1. Аксиально - симметричный электронный поток, создаваемый многоэлектродной пушкой, фокусируется продольным магнитным полем соленоида, проходит внутри спиральной замедляющей системы и оседает на коллекторе. Выбор потенциала системы позволяет обеспечить длительное синхронное взаимодействие электронов и замедленной волны. Микроволновые колебания, поданные на вход ЛБВ, возбуждают прямую волну в спирали. Продольная составляющая электрического поля этой волны длительное время воздействует на электронный поток, модулируя его по скорости. Скоростная модуляция приводит к возникновению переменной составляющей тока. В свою очередь, переменный ток наводит дополнительные заряды и токи в спирали. Если фазовая скорость волны в спирали v_0 близка к средней скорости электрона v_{ϕ} , то наведенные заряды и токи "суммируются", происходит нарастание амплитуды волны вдоль спирали.

Детали конструкции ЛБВ указаны на рис. 1 : 1-цоколь; 2-накал; 3-катод; 4-управляющий электрод; 5-анод1; 6-спираль (анод 11); 7-арматура ЛБВ; 8-коллектор;

9-вывод коллектора; 10-баллон лампы; 11-коаксиальные ввод и вывод СВЧ-энергии; 12- прямоугольный волновод; 13-четвертьволновый дроссель; 15 - поглотитель. Ввод и вывод СВЧ колебаний осуществляется с помощью коаксиальных передающих линий, соединенных с прямоугольными волноводами. В волноводах распространяется волна низшего типа (H_{10}). Составляющая напряженности электрического поля этой волны перпендикулярна широким стенкам и направлена вдоль антенны, соединенной со спиралью. Волновод и антенна согласуются с замедляющей системой с помощью участка спирали с переменным шагом. Для уменьшения просачивания СВЧ энергии в область пушки и коллектора используются два четвертьволновых дросселя.

В реальных условиях никогда не достигается идеальное согласование на входе и выходе лампы. В ЛБВ возникают отраженные волны и возникает обратная связь, которая может привести к самовозбуждению усилителя. Для уменьшения влияния отражений замедляющая система или окружающий ее диэлектрик на некотором расстоянии от входа лампы покрывается слоем поглощающего вещества. Прямая волна спирали почти полностью в нем затухает, затем вновь наводится модулированным по плотности потоком. Встречная волна, отраженная от выходного конца спирали, затухает в поглотителе и вновь практически не наводится, так как ее фазовая скорость значительно отличается от скорости электронов.

2. УСИЛЕНИЕ СЛАБОГО СИГНАЛА В ЛБВ

Линейная теория ЛБВ будет излагаться в рамках метода связанных волн. Он позволяет дать энергетическую трактовку процессов в различных приборах с длительным взаимодействием электронов и электромагнитного поля. Метод основан на совместном решении приближенных уравнений поля и электронного потока. При этом используются следующие предположения:

- а) электронный поток, фокусируемый магнитным полем, движется в направлении оси системы (ось z), радиальными смещениями можно пренебречь;
- б) в замедляющей системе распространяются только основные волны (прямая и встречная), пространственные и временные гармоники не рассматриваются;
- в) с полем спирали взаимодействуют только две волны электронного потока: медленная и быстрая волны пространственного заряда (МВПЗ и БВПЗ). Их скорости мало отличаются от средней скорости электронов.

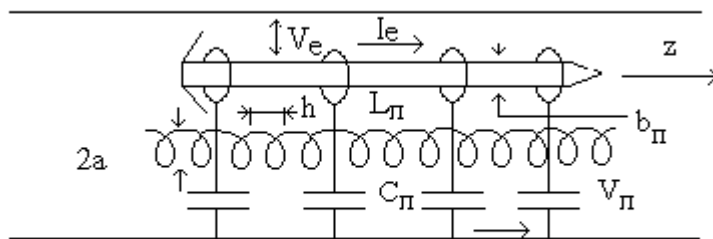


Рис.2 Эквивалентная схема ЛБВ.

Подробный вывод уравнений связанных волн дается в описании задачи "ЛОВ-генератор". В общем случае получается система четырех уравнений первого порядка, описывающих взаимодействие двух волн пространственного заряда и двух волн

замедляющей системы - прямой и встречной. Вид уравнений зависит от дисперсии волн. В ЛБВ дисперсия основной волны замедляющей системы положительная, в ЛОВ - отрицательная. Фазовые и групповые скорости волн поля в ЛБВ имеют одинаковое направление, в ЛОВ для обратных волн скорости противоположно

направлены. Замедляющая структура ЛБВ заменяется эквивалентным фильтром нижних частот, для ЛОВ - фильтром верхних частот. В ЛБВ электронный поток находится в синхронизме с прямой волной, в ЛОВ - поток взаимодействует со встречной обратной волной.

Для наглядного описания процессов в ЛБВ будем считать, что электронный поток взаимодействует с прямой волной эквивалентного фильтра нижних частот, а поле возбуждается наведенными токами (рис.2).

Замедляющей системой ЛБВ малой мощности обычно служит проводящая спираль, помещенная в волновод. Как и для всякой периодической структуры, поле спирали представляется в виде суммы пространственных гармоник. Однако, ввиду "геометрического" характера замедления, высшие пространственные гармоники малы, имеют подчиненное значение и в дальнейшем не рассматриваются. Фазовая скорость основной волны (нулевой пространственной гармоники) в широком интервале частот дается выражением

$$v_{\Phi} \cong \frac{ch}{2\pi a}, \quad (1)$$

где h и a - шаг спирали и ее радиус, c - скорость света в свободном пространстве. Физический смысл указанного соотношения состоит в следующем: за время распространения волны вдоль одного витка со скоростью c на расстояние $2\pi a$ фаза волны вдоль оси спирали проходит меньший путь, равный шагу спирали h .

В применении к реальной спирали соотношение (1) является приближенным, оно не учитывает влияния зарядов и токов различных витков друг на друга, что приводит к зависимости фазовой скорости основной волны от частоты сигнала, т.е. к дисперсии волн [2].

Эквивалентный фильтр нижних частот, заменяющий спирально-проводящую систему, содержит последовательно включенные индуктивные сопротивления $j\omega L_{\text{Л}}$ и параллельные емкостные проводимости $j\omega C_{\text{Л}}$ ($L_{\text{Л}}$ и $C_{\text{Л}}$ - погонные индуктивности и емкости). Постоянная распространения $\beta_{\text{Л}} = \omega/v_{\Phi}$ дается формулой $\beta_{\text{Л}} = \omega(L_{\text{Л}}C_{\text{Л}})^{1/2}$. Волновое сопротивление имеет вид $Z_{\text{Л}} = (L_{\text{Л}}/C_{\text{Л}})^{1/2}$. Для нахождения $L_{\text{Л}}$ и $C_{\text{Л}}$ приравниваются постоянные распространения реальной спирали и эквивалентного фильтра, а также волновое сопротивление $Z_{\text{Л}}$ и сопротивление связи спирали. Сопротивление связи выражается через квадрат продольной составляющей напряженности электрического поля, мощность волны и ее постоянную распространения, как это делается в теории ЛОВ (см. формулу (6) описания задачи "ЛОВ-генератор").

Замедляющая структура ЛОВ представлена в виде эквивалентного фильтра верхних частот последовательно включенными емкостными сопротивлениями $-j/\omega C_{\text{Л}}$ и параллельно включенными проводимостями $-j/\omega L_{\text{Л}}$. Фильтр нижних частот имеет противоположные знаки сопротивления и проводимостей. При переходе к ЛБВ в уравнениях связанных волн ([1], формулы (31), (32)) изменяются знаки, стоящие перед постоянной распространения эквивалентной линии передачи. Система уравнений четырех связанных волн ЛБВ приобретает вид [3]:

$$\left(\frac{d}{dz} - j(\beta_e \pm \beta_q)\right)a_{\pm} = \frac{j}{2} \left(\frac{Z_{\text{Л}}}{Z_n}\right)^{1/2} \beta_e \frac{d}{dz} (A_{+} + A_{-}), \quad (2a)$$

$$\left(\frac{d}{dz} \pm j\beta_q\right)A_{\pm} = \pm \beta_e \left(\frac{Z_{\text{Л}}}{Z_n}\right)^{1/2} \frac{d}{dz} (a_{+} - a_{-}), \quad (2б)$$

где a_+ и a_- - комплексные амплитуды быстрой и медленной волн пространственного заряда с постоянными распространения $\beta_e + \beta_q$ и $\beta_e - \beta_q$, $\beta_q = \omega_q / v_0$, ω_q - частота плазменных колебаний с учетом спирали; A_+ и A_- - комплексные амплитуды прямой и встречной волн замедляющей системы с постоянными распространения $\pm \beta_L$; Z_n - волновое сопротивление пучка, рассматриваемого в качестве линии передачи: $Z_n = 2v_0 \omega_q / (I_0 \omega)$, V_0 - ускоряющий потенциал, I_0 - ток пучка.

Комплексные амплитуды нормальных волн определяются соотношениями:

$$a_{\pm} = \frac{1}{2\sqrt{2Z_n}} (V_1 \pm Z_n I_1) \quad , \quad (3a)$$

$$A_{\pm} = \frac{1}{2\sqrt{2Z_n}} (V_L \pm Z_n I_L) \quad , \quad (3b)$$

где V_1 и I_1 - напряжение и ток эквивалентной линии передачи, заменяющей пучок (кинетический потенциал потока и амплитуда первой гармоники тока), V_L и I_L - напряжение и ток эквивалентного фильтра, рис.2.

Дальнейшее теоретическое описание процессов в ЛБВ строится при упрощающих предположениях:

1. Энергообмен в ЛБВ определяется связью прямой волны спирали A_+ и двух волн электронного пучка a_+ и a_- .

2. Выполняется условие слабой связи: $1/2(Z_L/Z_n)^{1/2} \ll 1$.

При слабой связи волн амплитуды A_+ и a_{\pm} медленно меняются координатой. В правых частях системы уравнений (2) справедлива замена $d/dz \approx -j\beta_e$. Уравнения (2) приобретают вид

$$\left(\frac{d}{dz} - j(\beta_e \pm \beta_q) \right) a_{\pm} = -\frac{j}{2} \sqrt{\frac{Z_L}{Z_n}} \beta_e A_+ \quad , \quad (4a)$$

$$\left(\frac{d}{dz} \pm j\beta_q \right) A_{\pm} = -\frac{j}{2} \sqrt{\frac{Z_L}{Z_n}} \beta_e (a_+ - a_-) \quad , \quad (4b)$$

Решение уравнений (4) производится для граничных условий на входе ЛБВ ($z=0$): $a_{\pm}(0)=0$, $|A_+(0)| = A_{ВХ}$, соответствующих подаче гармонического сигнала $A_{ВХ} \exp(j\omega t)$ на вход замедляющей системы. Для дальнейшего анализа проведем замену параметров

$$\beta_L = \beta_e (1 + Cb) \quad , \quad \beta_q = \beta_e c\sqrt{4QC} \quad , \quad \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_L}{Z_n}} = \frac{C}{\sqrt{2(4CQ)}^{1/4}} \quad ,$$

где b - параметр расстройки скоростей, C - параметр усиления теории ЛБВ, $C^3 = (Z_L I_0) / (4V_0)$, QC обобщенный параметр пространственного заряда.

Решение (4) будем искать в виде $e^{-\Gamma z}$, где $\Gamma = j\beta_e (1 + C\delta)$. Условие разрешимости (4) является обращение в нуль детерминанта системы. Это условие приводит к кубическому уравнению относительно поправки к постоянной распространения

$$(\delta^2 + 4QC)(j\delta - b) = 1 \quad , \quad (5)$$

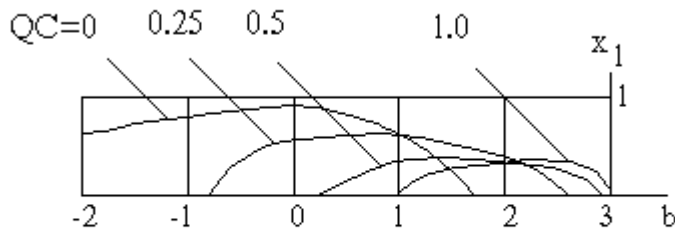


Рис.3 Зависимость параметра нарастающей волны от расстройки $QC=0; 0.25; 0.5; 1.0$.

Корни (5) записываются в виде двух комплексных величин $\delta_{1,2} = x_{1,2} + jy_{1,2}$ ($x_2 = -x_1$), соответствующих возрастающей и затухающей волнам, и действительной величины b_3 , относящейся к волне,

распространяющейся с постоянной амплитудой, Изменение постоянной возрастающей волны в зависимости от расстройки показана на рис. 3 (заметим, что теория связанных волн не справедлива для случая точного равенства $QC=0$). При малых QC максимальное значение x_1 равно $(3)^{1/2}/2$. С увеличением QC фазовые скорости медленной и быстрой волн пучка $v = v_0 / (1 + (C^2 4QC)^{1/2})$ начинают все быстрее отличаться и при $QC \gg 1$ прямая волна спирали взаимодействует главным образом с медленной волной пучка. Усиление падает и наблюдается только при положительных расстройках ($b > 0$).

Двухволновой механизм усиления ЛБВ при $QC \geq 1$ может быть легко проанализирован. Уравнения двух связанных волн A_+ и a_- при подстановке $e^{-\Gamma z}$ позволяют найти постоянные распространения возрастающей и затухающей волн

$$\delta_{1,2} = \pm x_{1,2} + jy_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{1}{2\sqrt{4QC}} - \left(\frac{b - \sqrt{4QC}}{2}\right)^2} - j\left(\frac{b + \sqrt{4QC}}{2}\right) \quad (6)$$

Если выполняются условия синхронизма медленной волны и волны спирали $\beta_L = \beta_e + \beta_q$ ($b^2 = 4QC$), то постоянная $|x_{1,2}|$ достигает максимума $|x_{1,2}| = \sqrt{1/2} \sqrt{4QC}$. Амплитуда возрастающей части волны в спирали $|A_{+1}|$

увеличивается с координатой по следующему закону $e^{-\text{Re}\Gamma z} = \exp\left(\frac{\beta_e cz}{\sqrt{2(4QC)}^{1/4}}\right)$.

Волна в замедляющей структуре переносит положительную мощность в направлении оси z . Медленная волна пучка в системе координат, движущейся со скоростью v_0 , распространяется в отрицательном направлении ($-z$). Увеличение амплитуды медленной волны приводит в среднем к уменьшению потока энергии электронов. Так как групповая скорость пучка всегда положительна, $v_{гр} = v_0$, то медленная волна переносит отрицательную энергию $E_{1-} < 0$ и характеризуется отрицательной мощностью $P_{1-} = E_{1-}$, $v_{гр} < 0$. В теории связанных волн показывается, что в пучке сохраняется полная безразмерная мощность P , равная сумме мощностей взаимодействующих волн

$$P = P_+ + P_{-1} = \left(|A_+|^2 - |a_-|^2\right) = \text{const} \quad (7)$$

Экспоненциальное увеличение амплитуды поля спирали $|A_{+1}| \approx |A_+|$ должно сопровождаться экспоненциальным возрастанием по модулю амплитуды медленной волны $|a_-| \approx |a_-|$. Отметим, что при синхронизме с быстрой волной $b = -(4QC)^{1/2}$ связь волн A_+ и a_- сопровождается не усилением, а периодической перекачкой энергии между волнами [3].

Общее решение двухволновой задачи при учете формулы (4а) имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_- &= \mathbf{d}_1 e^{-\Gamma_1 z} + \mathbf{d}_2 e^{-\Gamma_2 z}, \\ \mathbf{A}_+ &= j\sqrt{2} \sqrt[4]{4QC} (\mathbf{d}_1 (\delta_1 + j\sqrt{4QC}) e^{-\Gamma_1 z} + \mathbf{d}_2 (\delta_2 + j\sqrt{4QC}) e^{-\Gamma_2 z}), \quad (8) \\ \Gamma_{1,2} &= j\beta_e (1 + C\delta_{1,2}), \quad \delta_{1,2} = x_{1,2} + jy_{1,2}, \end{aligned}$$

где d_1 и d_2 - постоянные интегрирования. Используя граничные условия на входе ($z=0$)

$$\mathbf{a}_-(0) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{d}_1 + \mathbf{d}_2 = \mathbf{0};$$

$$\mathbf{A}_+(0) = \mathbf{A}_{\text{вх}} = j\sqrt{2} \sqrt[4]{4QC} (\mathbf{d}_1 (\delta_1 + j\sqrt{4QC}) + \mathbf{d}_2 (\delta_2 + j\sqrt{4QC})),$$

можно найти d_1 и d_2 . Выражения для мощностей двух взаимодействующих волн спирали и пучка принимают вид

$$P_+ = |\mathbf{A}_+|^2 = A_{\text{вх}}^2 (1 + F \operatorname{sh}^2 \beta_2 C x_1 z), \quad (9a)$$

$$P_{1-}(z) = -|\mathbf{a}_-|^2 = A_{\text{вх}}^2 - P_+(z), \quad (9b)$$

где $F = (1 + (\beta_e + \beta_q - \beta_L) \frac{2V_0 \beta_q}{I_0 Z_L \beta_e^2})^{-1}$ - коэффициент связи. На больших расстояниях

мощность прямой волны в спирали $P_+(z)$ быстро нарастает. На выходе ЛБВ при $z=L$ при условии синхронизма $\beta_L = \beta_e + \beta_q$, она равна

$$P_+(L) = A_{\text{вх}}^2 \exp(2\beta_e C x_1 L). \quad (10)$$

Коэффициент усиления ЛБВ без поглотителя при условии синхронизма дается выражением:

$$G(\text{дб}) = 10 \lg \frac{P_+(L)}{P_+(0)} \cong 54.6 x_{1m} \text{CN} - 6, \quad (11)$$

где $x_{1m} = \sqrt{\frac{1}{2\sqrt{4QC}}}$, $N = \frac{\beta_e L}{2\pi}$ - число электронных длин волн, укладываемых в

спирали за вычетом поглотителя. По мере усиления мощность пучка уменьшается на величину P_{1-} , но не может стать отрицательной. Линейная теория справедлива до тех пор, пока мощность медленной волны по модулю гораздо меньше постоянной составляющей мощности пучка, $|P_{1-}| \ll P_0 = I_0 V_0$.

Формула (11) является приближенной. При ее выводе не учитывались распределенные потери в спирали и потери в локальном поглотителе. Кроме того, она применима лишь при условии $QC \gg 1$, в то время как в реальных условиях работы лампы возможны режимы, для которых $QC \ll 1$.

Все эти дополнительные факторы могут быть учтены при более полном трехволновом решении задачи для ЛБВ с поглотителем. Более полная теория (см., например, [2-4]) дает следующее выражение для коэффициента усиления ЛБВ:

$$G(\text{дб}) = 54.6 \left(x_1 - \frac{x}{3} \right) \text{CN} - 14.5 \quad (12)$$

где, так же как и в выражении (11), x_1 - параметр нарастающей волны, d_x - параметр "холодных" потерь в спирали, зависящий от конструкции лампы (обычно $d_x \approx 1$). Появление коэффициента $1/3$ означает, что потери в ЛБВ меньше "холодных" потерь. Такой результат легко объясним, т.к. энергия поля передается не только по спирали, но и по пучку. Зависимость x_1 от QC при условии синхронизма и для $QC < 1$ записывается в виде простого выражения

$$x_{1m} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(1 - \frac{4}{3} QC\right),$$

соответствующего огибающей, проводимой по максимумам кривых рис. 3. В трехволновом режиме усиления мощность входного сигнала распределяется по большему числу волн, чем в двухволновом режиме, поэтому в формуле (12) параметр начальных потерь $G_{НП} = -14,5$ дБ ($N=0$) превышает соответствующий параметр $G_{НП} = -6$ дБ формулы (11).

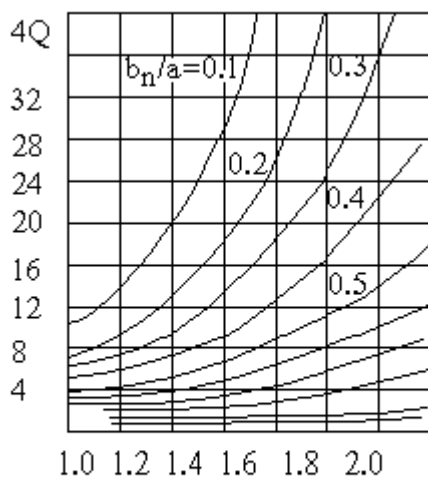


Рис.4 Зависимость параметра $4Q$ от $\beta_e a$

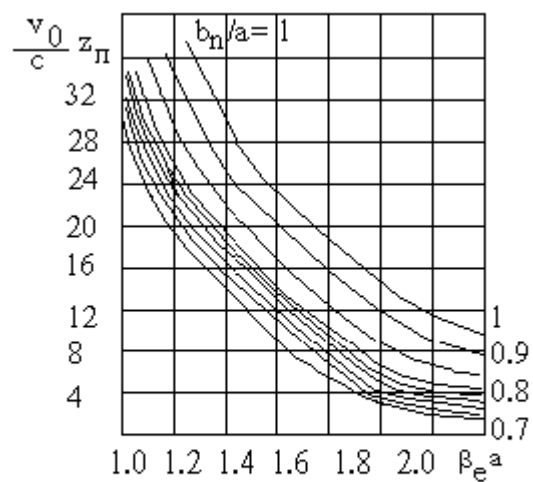


Рис.5 Зависимость $\frac{v_0}{c} z_n$ от $\beta_e a$

Для вычисления коэффициента усиления G (дБ) по формуле (12) необходимо знать параметры $4QC$ и C . Параметр $4Q$ находится по данным рис.4, где по оси абсцисс отложена величина $\beta_e a$ (a -радиус спирали), а кривые графика даны для различных отношений b_n/a , b_n -радиус электронного пучка. Параметр C зависит от сопротивления $Z_{Л}$, $C = \sqrt[3]{(I_0 Z_{Л}) / (4V_0)}$. Зависимость $V_0 Z_{Л} / C$ от $\beta_e a$ приведена на рис.5. Параметр замедления пучка находится по формуле $c/v_0 = 505 / \sqrt{V_0}$ (В). Параметр потерь следует брать равным $d_x = 1,15$.

3. ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ НА УСИЛЕНИЕ ЛБВ

Нелинейные эффекты в электронном потоке снижают усиление гармонического сигнала в ЛБВ и приводят к преобразованию частоты сложного входного сигнала. Нелинейные процессы определяют также динамический диапазон ЛБВ -диапазон изменения мощности входного сигнала, при котором усиление остается приблизительно постоянным. В режиме слабых сигналов нелинейные эффекты малы и коэффициент усиления не зависит от величины входного сигнала. При увеличении мощности выше определенного уровня начинают проявляться нелинейные эффекты при группировании электронов и усиление падает. Спектр сложного сигнала обогащается комбинационными составляющими.

При больших сигналах линейная теория ЛБВ несправедлива. Если оставаться в рамках аналитического подхода к нелинейной теории, то в исходном уравнении (формула (12) [1]) необходимо учитывать произведения переменных величин (например, $\rho \sim v \sim$ в выражении для плотности тока $i = \rho v = \rho_0 v \sim + v_0 \rho \sim + \rho \sim v \sim$). В теорию входят переменные величины не только на частотах сигнала, но и на частотах гармонических и комбинационных составляющих. Такое построение теории оказывается удовлетворительным только при малых нелинейных поправках. Современная нелинейная теория ЛБВ, справедливая при любых нелинейностях, основана на использовании дискретных моделей электронного пучка (модели крупных частиц). Наибольшее распространение получила одномерная дисковая модель аксиально-симметричного потока. В этой модели участок пучка в одну электронную длину волны разбивается на определенное число заряженных сечений-дисков и прослеживается движение дисков от катода до коллектора. Знание положения частиц в каждый момент времени позволяет найти гармоники тока и решать задачу о возбуждении поля спирали сгустками частиц. Нелинейная теория дала возможность определить зависимость усиления от мощности входного сигнала, рассчитать КПД ЛБВ, найти изменение амплитуды и фазы полей вдоль системы и т.д. [6].

1. Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала.

В нелинейной теории установлено, что по мере увеличения мощности входного сигнала $P_{вх}$ усиление ЛБВ $G = P_{вых}/P_{вх}$ падает ($P_{вых} \cong P_+(L)$), мощность сигнала на выходе достигает максимума $P_{вых} = P_m$. Величина максимума зависит от многих факторов, однако для большинства ламп изменяется в небольших пределах около значения

$$P_m = |A_{+1}(L)| = \kappa C I_0 V_0, \quad (13)$$

где произведение $I_0 V_0$ - мощность по постоянному току, C -параметр усиления, коэффициент κ зависит от параметров пучка и замедляющей системы. Для ЛБВ, используемой в задаче, $\kappa = 0.1$.

Заметное изменение коэффициента усиления G наблюдается при мощности входного сигнала, превышающей значение $P_{вхV} = P_m/G_0$, где G_0 -усиление малого сигнала. Зависимость коэффициента усиления G от уровня входного сигнала в области $P_{вх} > P_{вхm}$ при малых нелинейных амплитудных искажениях представляется в виде разложения в ряд по степеням относительных значений мощности. Это разложение удобно выразить в децибеллах

$$G(\text{дб}) = G_0 \left(1 - \left(\frac{P_{вх}(\text{дб}) - P_{вхm}(\text{дб})}{P_{вхm}(\text{дб})} \right)^2 - \dots \right), \quad (14)$$

где G_0 (дБ) дается выражением (12), $G_1 < 0$, $P_{вх}(\text{дб}) = 10 \lg \left(\frac{|A_+(0)|^2}{I_0 V_0} \right)$. Выходной

сигнал в максимуме также выражается в децибеллах: $P_{вх}(\text{дб}) = 10 \lg \left(\frac{|A_+(L)|^2}{I_0 V_0} \right)$.

Если $P_{вых} \approx P_m$, то для входного сигнала $P_{вхm}$ выполняется приближенное соотношение

$$P_{вхm}(\text{дб}) \cong P_m(\text{дб}) - G_0(\text{дб}). \quad (15)$$

2. Фазовые искажения и преобразование спектра близких частот.

Наряду с амплитудными искажениями, описываемыми формулой (14), большую роль играют фазовые искажения - зависимость фазы выходного сигнала от амплитуды сигнала на входе. Нелинейный фазовый сдвиг $\Delta\Psi_H(L)$ всегда имеется в ЛБВ, даже при слабых сигналах, когда амплитудные искажения пренебрежимо малы. Механизм сдвига фаз можно понять на основании энергетических соотношений. По мере увеличения мощности возрастающей волны в ЛБВ $P_+(z) = |A_{+1}(z)|^2$ средняя мощность пучка убывает на такую же величину $\Delta P_e(z) = |A_{+1}(z)|^2$ т.е. торможение потока может быть охарактеризовано усредненным изменением ускоряющего потенциала $\Delta V_0(z)$, которое связано с соотношением $\Delta P_e(z) : \Delta V_0(z) I_0 = \Delta P_e(z)$. Амплитуда возрастающей волны в сечении z выражается через амплитуду на выходе

$$|A_{+1}(z)| = |A_{+1}(L)| e^{-\text{Re} \Gamma_1 (L-z)} .$$

Для относительного изменения потенциала потока вдоль лампы получаем соотношения

$$\frac{\Delta V_0(z)}{V} = - \frac{|A_{+1}(z)|^2}{I_0 V_0} = \frac{|A_{+1}(L)|^2}{I_0 V_0} \exp(-2\text{Re} \Gamma_1 (L-z)) = \eta_e \exp(-2\text{Re} \Gamma_1 (L-z)).$$

Изменение средней скорости на участке $0-z$ изменяет фазу сигнала на величину $\Delta\Psi_1(z)$:

$$\Delta\Psi_1(z) = \Delta I_{m1} \Gamma \Delta z \cong \Delta \beta_e \Delta z = - \frac{\Delta v_0}{v_0} \beta_e \Delta z \cong - \frac{1 \Delta v_0(z)}{2 v_0} \beta_e \Delta z. \quad (16)$$

Общий нелинейный фазовый сдвиг Ψ_H получается после интегрирования (16) по всей длине лампы

$$\Psi_H = \int_0^L d\Psi_1(z) = \frac{1}{2} \eta_e \beta_e \int_0^L \exp(-2\text{Re} \Gamma_1 (L-z)) dz = \frac{\eta_e \beta_e}{4 \text{Re} \Gamma_1} .$$

При малых QC в центре области синхронизма $\text{Re} \Gamma_1 = (3/4)^{1/2} \beta_e$ С. Изменение фазы Ψ_H определяется КПД и параметром усиления

$$\Psi_H = 0.3 \frac{\eta_e}{c} . \quad (17)$$

Если на вход ЛБВ подается сложный многочастотный сигнал, то нелинейный сдвиг фаз (17) приведет к появлению комбинационных составляющих. Покажем это на примере преобразования спектра двух сигналов равных амплитуд и близких частот: $\omega_{1,2} = (\omega \pm \Omega/2)$, $A_{\text{ВХ}}(t) = A_0(\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t))$. На входе ЛБВ результирующий сигнал медленно изменяется по амплитуде: $A_{\text{ВХ}}(t) = 2A_0 \cos(\Omega t/2) \times \cos(\omega t)$. На выходе лампы изменение по амплитуде сопровождается периодическим увеличением фазы на величину Ψ_H :

$$\Psi_H = \frac{0.3 |A(L)|^2}{c I_0 V_0} = \frac{1.2 A_0^2 G^2}{c I_0 V_0} \cos^2 \frac{\Omega t}{2} = m(1 + \cos \Omega t) ,$$

где $G_A = 10^{G_0/20}$ -усиление по амплитуде, $m = \frac{0.6 A_0^2 G^2}{c I_0 V_0} A$. Выходной сигнал

промодулирован по амплитуде и по фазе

$$A_{\text{ВЫХ}}(t) = 2A_0 G_A \cos \frac{\Omega t}{2} \cos(\omega_0 t + m(1 + \cos \Omega t)). \quad (18)$$

После тригонометрических преобразований и использования разложений

$$\begin{aligned} \cos(m \cos \Omega t) &= J_0(m) - 2J_2(m) \cos(2\Omega t) + 2J_4(m) \cos(4\Omega t) + \dots, \\ \sin(m \cos \Omega t) &= 2J_1(m) \cos(\Omega t) - 2J_3(m) \cos(3\Omega t) + 2J_5(m) \cos(5\Omega t) + \dots \end{aligned}$$

относительное значение выходного сигнала $A_{\text{ВЫХ}}(t)$ представляется в виде спектра основных частот ω_1 и ω_2 , а также частот комбинационных составляющих $\omega_1 - k\Omega$ и $\omega_2 + k\Omega$ ($k=1,2,\dots$):

$$\begin{aligned} A'_{\text{ВЫХ}}(t) &= J_0(m)(\cos(\omega_1 t + m) + \cos(\omega_2 t + m)) - \quad (19) \\ &- 2J_1^2(m)(\sin(\omega_1 t + m) + \sin(\omega_2 t + m) + \sin(\omega_1 t - \Omega t + m) + \sin(\omega_2 t + \Omega t + m)) + \\ &+ 2J_2(m)(\cos(\omega_1 t - \Omega t + m) + \cos(\omega_2 t + \Omega t + m) + \cos(\omega_1 t - 2\Omega t + m) + \cos(\omega_2 t + 2\Omega t + m)) - \\ &- 2J_3(m)(\cos(\omega_1 t - 2\Omega t + m) + \cos(\omega_2 t + 2\Omega t + m) + \cos(\omega_1 t - 3\Omega t + m) + \cos(\omega_2 t + 3\Omega t + m)) \dots \end{aligned}$$

Заметим, что отношение мощностей комбинационных составляющих $k=1,2,\dots$ к мощности основного сигнала дается соотношением

$$\frac{P_{1,x}}{P_{1,0}} = \frac{P_{2,x}}{P_{2,0}} = \frac{J_x^2(m)}{J_0^2(m)}. \quad (20)$$

Комбинационные составляющие выходного сигнала в задаче наблюдаются с помощью спектрального анализатора.

4. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

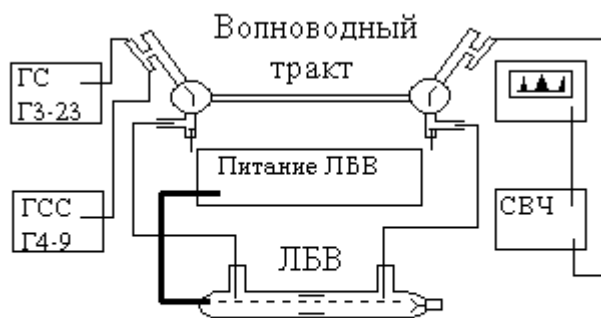


Рис.6 Блок-схема экспериментальной установки

широкополосный высокочувствительный усилитель со сплошным аксиально-симметричным пучком, проходящим внутри спиральной замедляющей системы (рис. 1).

Высокочастотный сигнал, поступающий на вход ЛБВ, возбуждает антенну, соединенную со спиралью. В спирали волна замедляется и ее фазовая скорость уменьшается по сравнению со скоростью света в вакууме примерно в 16 раз. Усиление лампы максимально при синхронизме потока и поля, который достигается при ускоряющем потенциале около 1200 вольт. Точное значение потенциала синхронизации зависит от тока луча, величины входного сигнала и напряженности магнитного поля.

При малом входном сигнале (менее микроватта) ЛБВ работает в режиме линейного усиления. Коэффициент усиления не зависит от мощности входного сигнала. Если сигнал на входе достигает нескольких десятков микроватт и более, ЛБВ переходит в нелинейный режим, при этом усиление падает и может наступить насыщение выходного сигнала. В нелинейном режиме при подаче на вход ЛБВ нескольких гармонических сигналов происходит преобразование частоты, и на выходе лампы появляются комбинационные составляющие сложного усиленного сигнала.

2. Волноводный тракт и арматура ЛБВ.

Волноводный тракт (рис.6) включает в себя волноводно-коаксиальные переходы, два переключателя, переходы волновод - вход и волновод - выход ЛБВ, развязывающие элементы (в задаче для целей развязки используется затухание полей в коаксиальных соединительных кабелях). Высокочастотные колебания, поступающие от СВЧ генераторов, изменением положения переключателей могут быть поданы на вход ЛБВ или непосредственно направлены в спектроанализатор.

Арматура ЛБВ включает в себя коаксиальные волноводы входа и выхода, постоянные магниты для фокусировки электронного пучка, центральную трубку, содержащую баллон ЛБВ, цоколь ЛБВ.

3. Блок питания ЛБВ.

Блок включает источники питания ЛБВ и приборы индикации напряжений и токов, расположенные на передней панели. Напряжение питания регулируется около следующих оптимальных значений, отсчитываемых от потенциала катода: на управляющем электроде $U_{упр}^{опт} = -10$ в, на первом аноде $U^{опт} = 235$ в, на втором аноде, соединенном с замедляющей системой, $U_{зс}^{опт} = 1150$ в. На коллекторе поддерживается напряжение, равное напряжению спирали.

4. Генераторы СВЧ сигналов.

Блок-схема установки для экспериментального изучения ЛБВ показана на рис. 6. Установка включает в себя: 1-ЛБВ, 2-волновой тракт, 3-фокусирующие магниты ЛБВ, 4 - блок питания, 5 - генератор стандартных сигналов (ГСС) и измерительный генератор (ГС), 6 - спектроанализатор, 7 - развязывающие элементы.

1. Лампа с бегущей волной.

Изучаемая ЛБВ представляет собой

В задаче используются два генератора СВЧ колебаний 10 - сантиметрового диапазона длин волн: генератор стандартных сигналов (ГСС) ГЧ - 9 и измерительный генератор (ГС) ГЗ-23. Генератор стандартных сигналов Г4-9 позволяет получать калиброванные по частоте и мощности сигналы в диапазоне 2000 МГц - 3800 МГц. Он имеет два выхода: милливаттный (mW) и микроваттный (μ W). В задаче используется микроваттный выход СВЧ энергии. Атенюатор ГСС позволяет менять уровень выходного сигнала от 100 до 10^{-8} мкВт.

Более простой по конструкции клистронный генератор Г2-23 применяется при работе ЛБВ в многочастотном режиме. Он имеет два канала выхода. Сигнал снимается с канала 11. Частота генерации меняется в пределах 2950 - 4500 МГц. Мощность регулируется достаточно грубо аттенюатором со специальной шкалой в дБ от нескольких милливатт ("0" шкалы регулировки выхода) до 10^{-8} - 10^{-9} Вт (90 делений шкалы). Приборы Г4-9 и ГЗ-23 следует включать в режиме непрерывной генерации (н.г.).

5. Спектральный анализатор.

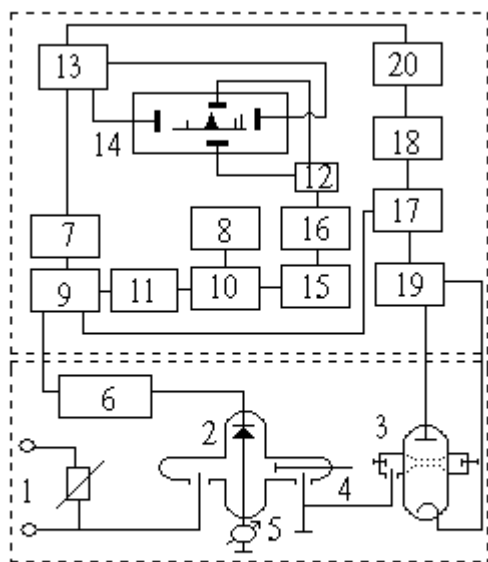


Рис.7 Блок-схема спектроанализатора СЧ-27

полупроводниковом детекторе он смешивается с сигналом гетеродина 3, выполненного на отражательном клистроне. Ток смесителя регулируется погружением антенны 4 и измеряется микроамперметром 5. Колебания разностных частот в интервале 160-40 МГц выделяются фильтром 6 с полосой 80 МГц и поступают на выход СВЧ блока. Далее через коаксиальный соединительный кабель разностные колебания подаются в блок анализатора спектра. В этом блоке они поступают в преобразователь, содержащий два гетеродина 7 и 8, смесители 9 и 10, усилители промежуточных частот 11 и 12. Колебания, создаваемые 1-м гетеродином 7, модулируются по частоте пилообразным напряжением, поступающим от генератора горизонтальной развертки 13 электроннолучевой трубки 14. В каждый момент времени на выходе первого смесителя преобразователя 9 выделяются спектральные компоненты сигнала, имеющие частоту 75 МГц, которые затем усиливаются в первом усилителе промежуточной частоты, и совершается переход к усилению во втором усилителе промежуточной частоты (8 ÷ 10 МГц) с регулируемой узкой полосой пропускания 1÷70 кГц. Спектр частот ограничивается фильтром 15 и регулируется ручками "обзор MHz" и "полоса пропускания kHz",

Спектральный анализатор С4-27 позволяет получать осциллографическое изображение спектра в координатах "частота - мощность". Его разрешающая способность по частоте определяется полосой пропускания фильтра усилителя промежуточной частоты, достигающей нескольких кГц. Чувствительность прибора $\sim 10^{-11}$ Вт.

Спектральный анализатор состоит из двух блоков: СВЧ и анализатора спектра промежуточной частоты (рис.6). Принципиальная схема прибора приведена на рис. 7. Исследуемый сигнал, поступающий на вход блока СВЧ, ослабляется входным аттенюатором 1 и подается на вход смесителя 2. На

расположенными на передней панели блока анализатора. Амплитуда сигнала ослабляется аттенуатором 16 "отсчет амплитуды dB" и изменяется потенциометром "усиление". С выхода усилителя промежуточной частоты 12 сигнал поступает на экран осциллографа 14. Разность частот между характерными точками спектра на экране осциллографа определяется с помощью меток от калибровочного генератора 17, модулируемого калибратором 18.

ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С АНАЛИЗАТОРОМ СПЕКТРА С4-27.

1. Включить блок анализатора спектра П.Ч. С4-27 и блок СВЧ. Приборы должны прогреться в течение 10-15 минут. Перед началом измерений переключатели приборов должны находиться в следующем положении:

	ЗАДАЧА ГЛПД	ЗАДАЧА ЛБВ
МЕТКИ MHz	ВЫКЛ.	ВЫКЛ.
ОБЗОР MHz	2-80	2-80
ВЕРТ. МАСШТАБ	МОЩН.	ЛОГ
ОТСЧЕТ АМПЛИТУД dB	0 dB	-49 dB
ДИАПАЗОН GHz	1.9-12	1.9-12

2. С помощью ручки \updownarrow спектроанализатора установите линию развертки на уровень 0 по экранной шкале ЛИН. Ручки \leftrightarrow и "разм" вращать запрещается.

3. Вращая ручку НАСТРОЙКА на блоке СВЧ, установить изображение спектра сигнала по центру экрана. Частота сигнала считывается со шкалы, установленной ручкой ДИАПАЗОН GHz. Если сигнал на экране и указатель частоты на шкале GHz движутся в разные стороны, то на экране изображен зеркальный сигнал гетеродина, параметры которого не совпадают с параметрами исследуемого сигнала.

4. Более точное измерение перестройки частоты в задаче ГЛПД производится с помощью меток. Установите ручку МЕТКИ в положение 1 или 10, включив тем самым экранные метки, идущие через 1 МГц или 10 МГц соответственно. С их помощью откалибруйте горизонтальную шкалу спектроанализатора. Для повышения точности измерений переключите ручку ОБЗОР МГц в положение 0.1-5, что соответствует меньшему масштабу экрана.

5. Измерение относительного уровня спектра в задаче ЛБВ производится в логарифмическом масштабе. Измерения производят по левой экранной шкале dBЛОГ от нижнего уровня вверх. Более точно измерения производятся методом заамещения.

5. УПРАЖНЕНИЯ.

УПРАЖНЕНИЕ 1. ВКЛЮЧЕНИЕ И НАСТРОЙКА ГСС И СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА. Установка настраивается для работы в режиме наблюдения стандартного сигнала генератора Г4-9 на экране спектроанализатора С4-27.

Волноводные переключатели переводятся в положение, соответствующее подаче колебаний с выхода ГСС ("выход W") на вход спектроанализатора, минуя ЛБВ. Входной аттенюатор спектроанализатора 1, рис. 9, должен быть выключен. При этом фишка коаксиального кабеля, идущего от 2 - го переключателя, должна быть подключена к разъему "вход GHz", "1,9 12".

Включите генератор Г4-9. После прогрева в течение 10 - 15 мин. установите нуль стрелочного прибора индикации, плавно вращая ручки "грубо" и "точно". Переключатель "индикация" должен находиться в положении "установка нуля".

Переключатель "индикация" переводится в положение "выход μW ". Настройте генератор на частоту 3000 МГц по показанию шкалы "MHz". Ручкой "уровень W" установите контрольное показание прибора -100 μA , соответствующее генерации колебаний с мощностью 100 мкВт. Мощность выходного сигнала регулируется ручкой "выход W" и отсчитывается по шкале аттенюатора ("W" или "dB"). Регулировка производится в пределах от 100 мкВт (-40 дБ от 1 Вт) до мкВт (-140 дБ от 1 Вт). Рекомендуемый уровень $10^{-2} \div 10^{-3}$ мкВт.

Включите блоки спектроанализатора. Установите постоянную времени ms "0,3" и развертку s "0,3". Выключите сигнал метки. Выберите максимальное значение полосы пропускания (ручка "полоса пропускания "kHz" находится в положении-300), линейный вертикальный масштаб "лин" и "обзор MHz" "2 80". Ручка плавной регулировки обзора "MHz" находится в центральном положении. Настройте гетеродин на генерацию колебаний в диапазоне "1,9 12 GHz" на частоте 3000 МГц. Выберите максимальное усиление промежуточной частоты (ручка "усиление") и минимальное затухание в аттенюаторе отсчета амплитуд (-49 дБ). На экране анализатора спектра заметно появление собственных шумов прибора. Ток смесителя должен находиться в пределах $10 \div 50$ μA .

Плавно регулируя частоту гетеродина вблизи частоты сигнала ГСС (ручкой "настройка"), добейтесь появления на экране спектральной линии сигнала. Изменяя затухание ГСС ручкой "выход μW ", установите удобный для наблюдения уровень спектральной линии. Установите обзор "0,1-5MHz" и снова настройте спектроанализатор. Уменьшая сигнал с выхода ГСС при одновременной регулировке тока смесителя, настройте спектроанализатор на максимальную чувствительность. На фоне собственных шумов должен уверенно наблюдаться сигнал ГСС мощностью $10^{-4} \div 10^{-5}$ мкВт (-100 \div -110 dB).

УПРАЖНЕНИЕ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ЛБВ.

1. Включите накал ЛБВ и после прогрева катода в течение 2 минут включите напряжение на электродах ЛБВ. Установите оптимальные напряжения на электродах, приведенные в п.3 - 5. Стрелка прибора "ток коллектора -Ik " не должна выходить за пределы шкалы.

2. Измерение усиления в центре области синхронизма. Переведите переключатели в положение, соответствующее прохождению СВЧ колебаний через ЛБВ. Вводите затухание в аттенюаторе ГСС "выход μW ". Добейтесь, чтобы на экране анализатора был выделен один основной сигнал без побочных сателлитов. Регулируя напряжение спирали " U_{3c} ", получите максимальное значение сигнала на выходе ЛБВ. Запишите значение напряжения.

Спектроанализатор и ЛБВ настроены правильно если на экране анализатора спектра сигнал ГСС виден на фоне собственных шумов ЛБВ, а спектральная линия уверенно фиксируется при затухании в аттенюаторе ГСС -120 -110 дБ. Измерение усиления ЛБВ при малом уровне входного сигнала проводится следующим образом. Регулируется затухание в аттенюаторе ГСС N_1 в пределах (-120 -140 дБ) и

усиление в блоке анализатора спектра. Выбирается удобное для измерений значение высоты спектральной линии на экране спектроанализатора по шкале "лин"- J_1 . Затем сигнал ГСС выключается путем перевода переключателя "индикация" в положение "установка нуля". Фиксируется уровень фона $-J$, вызванного собственными шумами. **(Следует отметить, что уровень шума обычно незначителен, и им можно полностью пренебречь.)** Запоминается разность $J_1 - J_0$. Волноводные переключатели устанавливаются в положение, соответствующее подаче сигнала ГСС непосредственно на спектроанализатор, минуя ЛБВ. Сигнал ГСС включается, а затем затухание аттенюатора "выход W" уменьшается до получения высоты спектральной линии, равной разности уровней $J_1 - J_0$. Записывается новое значение затухания N_2 . Разность двух затуханий $N_2 - N_1$ дает усиление ЛБВ в центре синхронизма

$$G_{\text{(дб)}} = N_2 - N_1, \quad (21)$$

Следует отметить, что при уровне сигнала ГСС менее "-110 дб" чувствительность аппаратуры столь велика, что на качество измерений влияют паразитные наводки СВЧ сигналов через соединения в волноводном тракте.

Проведите измерение усиления ЛБВ при меньшей чувствительности спектроанализатора (положения ручек "отсчет амплитуд" 6 дВ :-30, -20, -10, 0). Если уровень сигнала на порядок превышает уровень шумов ЛБВ, то для измерений учет шумов не существен ($J_0 > 0$) и на экране фиксируется полная высота спектральной линии.

УПРАЖНЕНИЕ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ СИНХРОНИЗМА ЛБВ.

Для определения области синхронизма зависимость коэффициента усиления ЛБВ G (дб) от напряжения спирали (U_{3C}) через 50 В в интервале от 1020 В до 1450. Рекомендуется переход к вертикальному масштабу "лог". При максимальном усилении в центре области синхронизма следует установить в аттенюаторе ГСС затухание, соответствующее совпадению вершины сигнала на экране с нулевым уровнем шкалы "дВ,лог". Дальнейшие измерения относительного изменения усиления $G(U_{3C}) - G_H$ проводятся по шкале экрана "дВ, лог". Пользуясь данными измерений в п.2, постройте график зависимости усиления ЛБВ от напряжения спирали. Найдите область синхронизма, внутри которой усиление отличается от максимального в два раза (на 3 дб).

УПРАЖНЕНИЕ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УСИЛЕНИЯ ЛБВ ОТ МОЩНОСТИ ВХОДНОГО СИГНАЛА.

Снимите зависимость коэффициента усиления ЛБВ от мощности входного сигнала в центре области синхронизма при показаниях аттенюатора ГСС -100, -90, -80, -70 дб. При входных сигналах, меньших 10^{-1} W (-70 дб), следуйте рекомендациям п.2. При сигналах большей мощности воспользуйтесь генератором ГЗ-23 и проведите измерения с подключением входного аттенюатора спектроанализатора, рис.7 (обычно в этом нет необходимости).

Для подключения входного аттенюатора коаксиальный кабель, идущий от волнового тракта, отсоединяется от фишки "вход GHz" "1,9-12" и подключается к гнезду "вход аттен GHz" "1-12". Коротким участком коаксиального кабеля (перемычкой) соединяются фишки "аттен" - "вход GHz", "1,9- 12". Выбирается линейный вертикальный масштаб, устанавливается минимальное ослабление входного аттенюатора (ручка "ослабление" поворачивается против часовой стрелки до упора). При затухании в аттенюаторе ГСС "-50дВ" и нулевых показаний

аттенюаторов спектроанализатора "отсчет амплитуд dB" сигнал на экране имеет удобную для измерения величину $1 \div 3$ см.

Включите генератор ГЗ-23. Установите показания аттенюатора этого генератора "60". Изменяя частоту генерации, получите второй сигнал на экране спектроанализатора. Регулировкой выхода 2 добейтесь равенства амплитуд сигналов, запишите показания шкалы аттенюатора ГЗ-23 N_0 . Оно соответствует мощности сигнала ГЗ-23 -10 мкВт. Выключите сигнал ГСС. Дальнейшие измерения усиления проводятся с прибором ГЗ-23.

Методика измерения коэффициента усиления ЛБВ остается прежней по формуле (29), однако отсчет затуханий N_1 и N_2 проводится не по шкале аттенюатора генератора, а по шкале аттенюаторов спектроанализатора "отсчет амплитуд dB". При каждом значении мощности входного сигнала регулируется затухание в первом аттенюаторе спектроанализатора, а напряжение замедляющей системы меняется до получения максимального сигнала на выходе. Рекомендуется устанавливать значения аттенюатора ГЗ-23 $N : N_0 -5\text{dB}$, $N_0 -10\text{dB}$, $N_0 -15\text{dB}$, $N_0 -20\text{dB}$ и т.д. Постройте график зависимости усиления ЛБВ в децибелах и напряжения замедляющей системы U_{3C} от мощности входного сигнала, выраженной также в децибеллах.

УПРАЖНЕНИЕ 5. ИЗУЧЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СПЕКТРА ДВУХЧАСТОТНОГО СИГНАЛА.

Включите генераторы Г4-9 и ГЗ-23 (выход 2). Подайте сигналы генераторов на вход ЛБВ. Установите минимальное затухание в аттенюаторе ГСС Г4-9 "-40 dB" и уровень сигнала ГЗ-23 "50" (пользуясь ручкой "регулировка выхода 2"). Подайте сигналы с выхода ЛБВ на спектроанализатор через его входной ослабитель "1-12", соединив предварительно гнезда "Аттен." и "1,9-12" отрезком коаксиального кабеля. Установите минимальное ослабление сигнала во входном аттенюаторе.

На измерительном блоке спектроанализатора включите вертикальный масштаб "лог" и обзор "2-80". Настройте частоты генераторов Г4-9 и ГЗ-23 до их примерного совпадения (по шкале частот). Добейтесь, чтобы на экране спектроанализатора появились две спектральные линии основных сигналов. Поместите их в центр экрана и выберите расстояние между линиями $3 \div 5$ мм. Вращая ручки "ослабление" и "отсчет амплитуды dB" спектроанализатора, получите картину спектра с отчетливо выраженными несколькими боковыми составляющими. Мощность колебаний генератора ГЗ-23 изменяется до получения равенства амплитуд основных сигналов на экране. Получается симметричная картина спектра, удобная для проведения отсчетов. Настройте ЛБВ на максимум усиления. Регулировкой усиления УП4 установите амплитуды основных сигналов, соответствующие нулю шкалы "dB лог". Зарисуйте картину спектра и произведите отсчеты амплитуд спектральных компонент по вертикальной шкале "dB лог". Запишите значения амплитуд основных сигналов и сигналов 3-х боковых комбинационных составляющих (в децибеллах).

Повторите цикл измерений для нескольких равных значений мощностей колебаний генератора ГЗ-23 и ГСС Г4-9, взятых через 5 дБ (-45,-50,-55 дБ и т.д.). Спектры отличаются различными уровнями боковых комбинационных составляющих. Зарисуйте типичные спектры. Постройте зависимости амплитуд спектральных компонент от мощности входного сигнала в децибеллах.

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА С ТЕОРИЕЙ.

1. Сравните экспериментально найденные значения коэффициента усиления ЛБВ с теоретическими, вычисленными по формуле (12). При этом воспользуйтесь следующими значениями параметров $b_{\text{п}}=0,1$ см, $a=0,13$ см, $c/v=505/(V_0(\text{В}))^{1/2}$. Величины $4Q$ и $Z_{\text{л}}$ вычисляются с помощью рис.4 и 5.

2. Проведите сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей коэффициента усиления от параметра расстройки (ускоряющего напряжения). Воспользуйтесь графиками рис.4. Оцените величину ширины области синхронизма (по уменьшению усиления на 3 дБ).

3. Определите уровень входного сигнала, при котором достигается насыщение усиления в ЛБВ. Для этого воспользуйтесь результатами измерений, полученными при выполнении упражнений 2,3,4. Найдите этот уровень теоретически, пользуясь формулой (13). Определите параметр $P_{\text{вхм}}$ по формуле (15). Постройте теоретическую зависимость усиления от мощности входного сигнала по формуле (14). Сравните теоретическую зависимость с экспериментальной.

4. Оцените величину параметра фазовой модуляции $m = \frac{0,6 A_0^2 G_{\text{л}}}{C I_0 V_0}$, где $A_0 \cong (P_{\text{вх}})^{1/2}$, $P_{\text{вх}}$ - мощность сигнала на выходе ГСС, $G_{\text{л}}$ -усиление ЛБВ, $G_{\text{л}}=10G_0/20$. Для нескольких m убедитесь, что при малых мощностях входного сигнала, согласно (13), соотношение мощностей комбинационных составляющих номеров k , 0 близко к отношению функции Бесселя $J_k^2(m)/J_0^2(m)$ (при малых мощностях входного сигнала, см. (20)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Описание задачи "ЛОВ-генератор".
2. В.М.Лопухин "Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электронными потоками". ГИТТЛ, 1953
3. У.Льюиссел "связанные и параметрические колебания в электронике". ИЛ, 1963
4. Дж.Пирс "Лампа с бегущей волной". Сов. радио, 1952
5. Ван-дер-Зил "Флуктуации в радиотехнике и физике". Госэнергоиздат, 1958
6. М.В.Цейтлин, А.М.Кац "Нелинейная теория ЛБВ". Сов. радио, 1964