

ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ СВЧ

Замедляющие линии передачи СВЧ применяются в составе усилительных и генераторных вакуумных устройств для регулировки фазовой скорости распространяющихся электромагнитных волн и получения режима синхронизации, необходимого для генерации или усиления. Существуют различные по устройству типы замедляющих линий передачи. Необходимое замедление волны в заданном частотном диапазоне (дисперсионная характеристика системы) обеспечивается видом линии замедления.

Представленный материал может быть полезен начинающим специалистам и студентам, изучающим электронные приборы и технику СВЧ.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Замедляющая линия передачи (или замедляющая система, ЗС) — это линия передачи СВЧ, уменьшающая фазовую скорость проходящих вдоль оси системы электромагнитных волн по сравнению со скоростью в свободном пространстве.

Степень замедления характеризуется коэффициентом замедления:

$$n = c/v_{\phi}, \quad (1)$$

где v_{ϕ} — фазовая скорость замедленной волны.

Если фазовая скорость волны снижена до величины, немного меньшей скорости потока электронов в СВЧ-приборе, то возможно взаимодействие (передача энергии) между электронным потоком и СВЧ-полем. Это используется в электронных приборах с длительным взаимодействием, таких как лампа с бегущей волной (ЛБВ), лампа с обратной волной (ЛОВ), магнетрон и других устройствах.

Коэффициент замедления n , необходимый для выравнивания скоростей электромагнитной волны и электронного потока при ускоряющем напряжении U , может быть найден на основе закона сохранения энергии для летящего электрона [5]:

$$m(v_{\phi})^2/2 = eU, \quad (2)$$

где m — масса электрона, e — его заряд, причем $e/m = 1,8 \times 10^{11}$ Кл/кг.

Из (1) и (2) следует, что:

$$n = c/v_{\phi} = 505/U^{1/2}, \quad (3)$$

где U — в В.

Например, для ускоряющего напряжения 100 В требуется замедление $n = 50$, а при 10000 В — замедление $n = 5$.

Формула (3) дает также обратную возможность: рассчитать необходимое напряжение U , если имеется система с известным коэффициентом замедления n .

Рассмотрим два примера использования замедляющих систем в наиболее распространенных электронных приборах: лампе бегущей волны со спиральной замедляющей системой и лампе обратной волны с замедляющей системой типа встречных штырей [5].

СПИРАЛЬНАЯ ЗАМЕДЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА

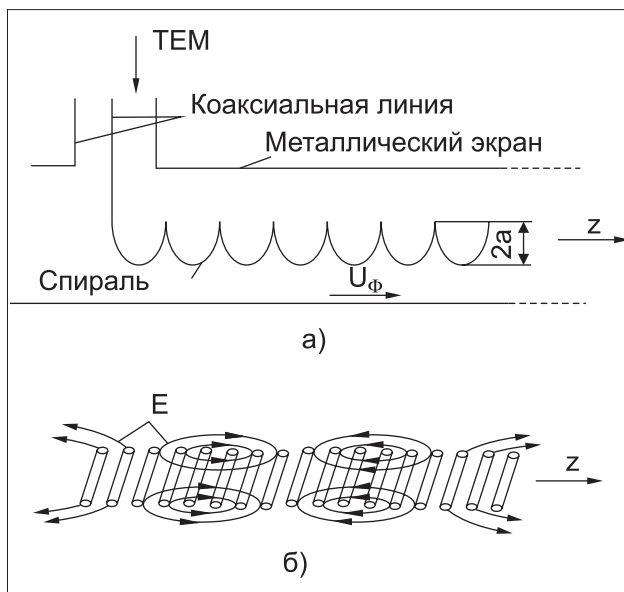
Рассмотрим спиральную ЗС в составе ЛБВ (рис. 1а) [1].

Электронный пучок сфокусирован и пролетает по оси спирали. На вход спирали волна попадает из коаксиальной линии, где имеет структуру ТЕМ. Структура поля вблизи спирали показана на рис. 1б. Электрическое поле между витками спирали имеет составляющую в направлении оси z , то есть параллельно направлению движения электронов, что обеспечивает взаимодействие электронного пучка с полем.

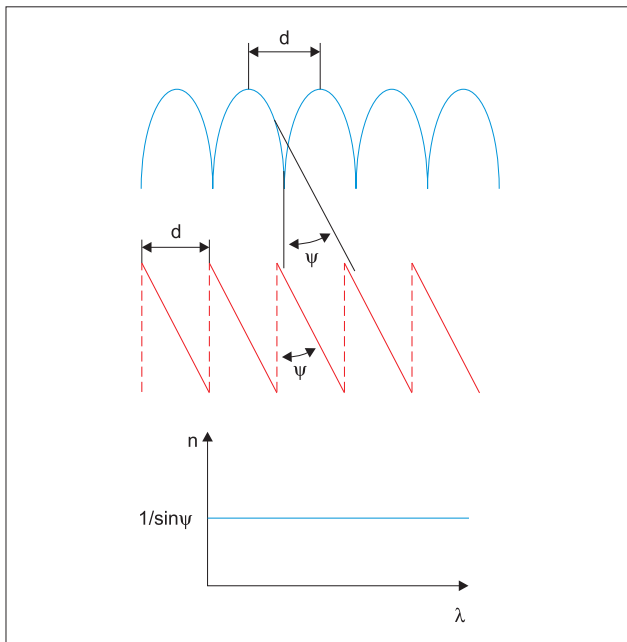
На рис. 2 [5] показан элемент спирали с углом намотки ψ и ее развертка. В первом приближении можно считать, что волна бежит вдоль витков со скоростью света «с» и имеет структуру ТЕМ. Обозначим длину витка l , а период намотки спирали — d . Отношение l/d равно отношению скоростей волны вдоль витка «с» и вдоль оси v . Из геометрических соображений:

$$n = l/d = 1/\sin\psi. \quad (4)$$

Эта формула приближенная, поскольку реально волна бежит со скоростью, несколько отличной от «с» из-за искривления проводников, взаимодействия полей с опорами спирали, полей противоположных сторон витков и т. д. Тем не менее она годится для оценок.



▲ Рис. 1. Спиральная ЗС в составе ЛБВ



▲ Рис. 2. Спираль и ее развертка

Как видно, в рамках принятых допущений рассматриваемая спиральная конструкция ЗС имеет коэффициент замедления, определяемый только геометрией структуры и не зависящий от длины волны.

Зависимость коэффициента замедления от длины волны ($n = f(\lambda)$) называется дисперсионной характеристикой ЗС. В данном случае она представляет собой горизонтальную линию (рис. 2), то есть дисперсия (наличие изменения n от частоты) в первом приближении для спирали отсутствует.

Спиральная ЗС широко используется в ЛБВ. Однако при переходе к более высоким частотам (миллиметровый диапазон) размеры спирали становятся очень малыми, и возникают трудности в изготовлении. Кроме того, при больших мощностях затрудняется теплоотвод. В этих случаях в ЛБВ применяются также другие типы замедляющих систем.

ЗАМЕДЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ТИПА «ВСТРЕЧНЫЕ ШТЫРИ»

В системе «встречные штыри» (рис. 3, [5]) электронный луч пролетает в осевом направлении слева направо вблизи замедляющей системы, он может быть сфокусирован в виде ленты. Приближенную оценку дисперсионной характеристики можно сделать в предположении, что волна бежит по зигзагообразному пути между штырями. При этом сдвиг фазы поля между точками А и В равен $k(h + L)$, где $h + L$ — путь, пройденный волной. К этому добавляется сдвиг фаз на π , обусловленный геометрическим «поворотом» вектора поля на 180° . Таким образом, общий фазовый сдвиг вдоль оси $\varphi = \pi - k(h + L) = \beta L$. (Здесь $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны в свободном пространстве, $\beta = 2\pi/\Lambda$, Λ — длина волны в замедляющей системе.)

Коэффициент замедления [4]:

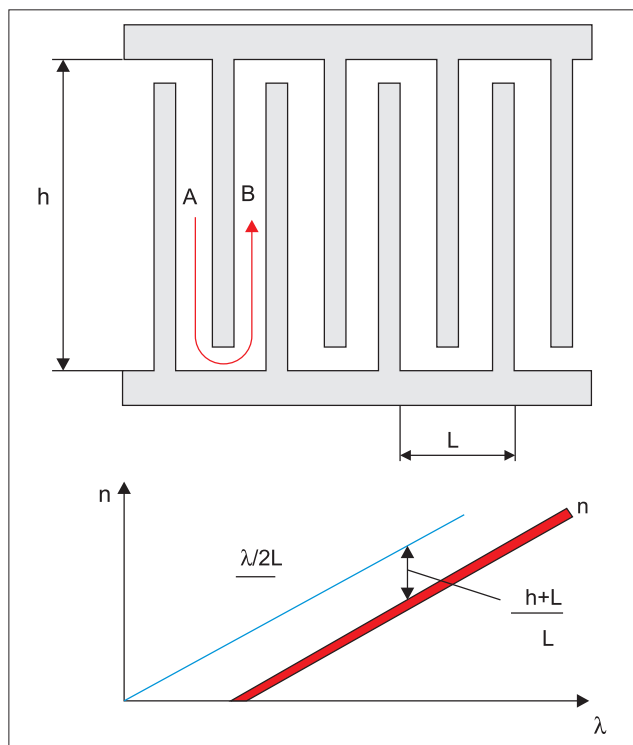
$$n = \varphi/\beta L = \lambda\varphi/2\pi L = (\lambda/2L) - (h + L)/L. \quad (5)$$

На рис. 3 видно, что коэффициент замедления возрастает, поскольку зависит от λ , то есть имеет место дисперсия.

Замедляющая система «встречные штыри» используется для создания ЛОВ.

ДРУГИЕ ТИПЫ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТЕХНИКЕ СВЧ

Кроме спирали и встречных штырей, в электронных приборах используются и другие ЗС, некоторые из них показаны на рис. 4 [5].



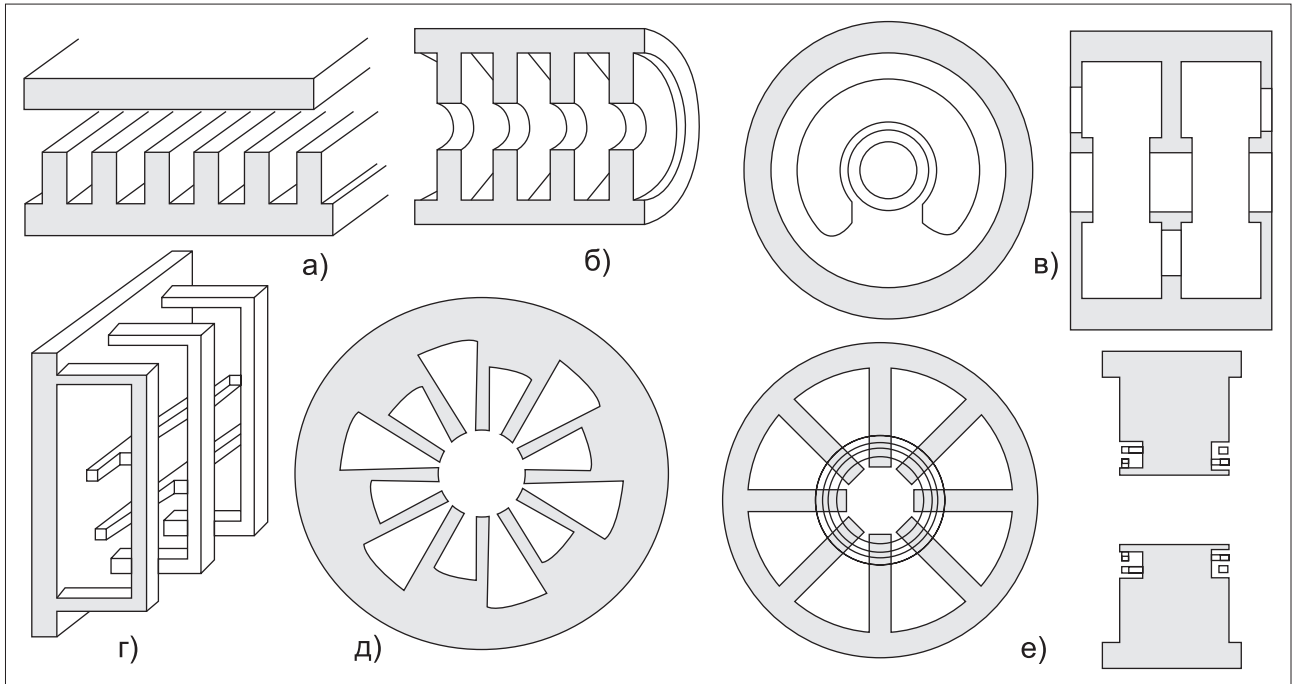
▲ Рис. 3. Замедляющая система типа встречных штырей

Замедляющая система типа «гребенка» (рис. 4а) по сравнению со спиральной ЗС обладает лучшей теплоотсеивающей способностью, большей жесткостью, применяется в режиме использования пространственных гармоник, о котором будет рассказано в дальнейшем. Она применяется в ЛОВ миллиметрового диапазона и в электронных приборах, называемых оротронами.

Диафрагмированный волновод (рис. 4б) может трактоваться как разновидность свернутой гребенки или как цепочка связанных через центральные отверстия цилиндрических резонаторов, возбуждаемых на типе колебаний E010. Для расширения полосы пропускания можно увеличивать диаметр отверстий, при этом увеличивается электрическая связь между соседними резонаторами. Однако при этом уменьшается сопротивление связи с лучом (ухудшается взаимодействие) и уменьшается усиление. Эта ЗС имеет малый коэффициент замедления, что, однако, хорошо подходит для ее использования, например, в линейных ускорителях электронов.

Цепочка связанных резонаторов (ЦСР) показана на рис. 4в. Связь между соседними резонаторами осуществляется через неполные кольцевые отверстия в боковых стенках. При этом, в отличие от диафрагмированного волновода, взаимодействие поля с электронным лучом не уменьшается, и могут быть получены достаточно большие коэффициенты усиления. Достоинством ЗС на основе диафрагм являются также хорошая теплопередающая способность, поэтому ЗС подобной конструкции широко применяются, например, в ЛБВ повышенной мощности.

Резонаторная система, свернутая в кольцо (рис. 4д, е), может быть также представлена как свернутая гребенка. Гладкая поверхность системы «гребенка» при этом трансформируется в центральный металлический цилиндр (на рисунке не показан), в качестве которого обычно выступает цилиндрический катод прибора. Отдельные щели устройства можно рассматривать как резонаторы, связанные в единую систему сложного резонатора. Для возбуждения желаемого типа колебаний в системе некоторые точки сложного резонатора могут быть связаны металлическими перемычками. Подобные кольцевые резона-



▲ Рис. 4. Различные типы замедляющих систем, применяемых в электронных приборах СВЧ

торы применяются в мощных генераторных приборах — магнетронах. В них под действием постоянного магнитного поля, приложенного перпендикулярно плоскости рисунка, образуется вращающийся электронный поток («спицы»), проходящий в зазоре между катодом и кольцевой системой резонаторов. Проходя мимо отдельных резонаторов, поток взаимодействует с ними.

Бугельная ЗС со связками (рис. 4г) также является кольцевой и применяется в мощных СВЧ-усилителях — амплитронах.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Свойства замедляющих систем как специфических линий передачи, с точки зрения выполняемых ими функций в электронных приборах, характеризуются следующими параметрами [3, 4].

1. Коэффициент замедления n

Он, как указывалось ранее, характеризует степень замедления электромагнитной волны замедляющей системой по фазовой скорости:

$$n = c/v_{\phi}, \quad (6)$$

где v_{ϕ} — фазовая скорость замедленной волны; c — скорость электромагнитных волн в свободном пространстве (скорость света).

Значения необходимых коэффициентов замедления n обычно находятся в интервале 3–50.

Существует также коэффициент замедления волны по групповой скорости v_r (скорости переноса энергии волной [2]):

$$n_r = c/v_r. \quad (7)$$

Коэффициенты замедления фазовой и групповой скоростей связаны формулой Релея:

$$n_r = n - \lambda dn/d\lambda. \quad (8)$$

2. Дисперсионная характеристика

Дисперсионная характеристика представляет собой зависимость коэффициента замедления от частоты или длины волны:

$$n = f(\omega) \text{ или } n = f(\lambda). \quad (9)$$

Параметр «дисперсия»:

$$D = (\Delta n/n)/(\Delta \lambda/\lambda). \quad (10)$$

указывает на наличие ($D \neq 0$) или отсутствие ($D = 0$) дисперсионной зависимости, ее величину и характер.

Дисперсионная характеристика может также изображаться зависимостью $\omega(\beta)$ [4].

3. Частотный диапазон

Частотный диапазон определяется интервалом частот, в котором коэффициент замедления n не выходит за пределы требуемых значений вследствие наличия дисперсии. Он может характеризоваться коэффициентом перекрытия по частоте:

$$K_{\omega} = \omega_{\text{в}}/\omega_{\text{н}}, \quad (11)$$

где $\omega_{\text{н}}$ и $\omega_{\text{в}}$ — соответственно нижняя и верхняя частоты рабочей полосы.

Наибольшей широкополосностью обладают спиральные ЗС — $K_{\omega} = 2$ и более; ЗС на связанных резонаторах (ЦСР) имеют $K_{\omega} = 1,3$ – $1,35$; для ЗС типа гребенки и встречных штырей $K_{\omega} \approx 1,2$; для резонаторных кольцевых замедляющих систем $K_{\omega} \approx 1,02$ – $1,05$.

4. Сопротивление связи

Сопротивление связи ($R_{\text{св}}$) — это специфический параметр линии передачи типа ЗС. Он является мерой эффективности взаимодействия электронного потока с продольной (z) составляющей электрического поля E_{zm} в ЗС:

$$R_{\text{св}} = |E_{\text{zm}}|^2/2 (\beta_m)^2 P, \quad (12)$$

где P — мощность потока энергии в ЗС; β_m — фазовая постоянная; индекс « m » отражает ту часть структуры поля замедляющей системы (гармонику), которая наиболее эффективно взаимодействует в данном приборе с электронным потоком.

Чем больше сопротивление связи, тем эффективнее взаимодействие электронов с полем и больше коэффициент усиления СВЧ-усилителя и его КПД. Например, параметр усиления ЛВБ $C_{\text{ЛВБ}}$ связан с $R_{\text{св}}$ соотношением [1]:

$$C_{\text{ЛВБ}} = (R_{\text{св}} I_0 / 4U_0)^{1/3}, \quad (13)$$

где I_0 — ток электронного луча, U_0 — напряжение на коллекторе.

Величина $R_{\text{св}}$ обычно составляет десятки Ом.

Теоретический расчет $R_{\text{св}}$ достаточно сложен, его величина часто определяется экспериментальным путем.

5. Затухание волны в ЗС

Затухание в ЗС определяется активными потерями непосредственно в элементах ее конструкции. В некоторых случаях (например, в спиральной ЗС) специально вводится согласованный локальный поглотитель для ослабления отраженной от выхода волны с целью обеспечения устойчивости работы прибора. При этом общее затухание соответственно увеличивается. В целом затухание может составлять 20–30 дБ.

6. Предельная передаваемая мощность

Предельная мощность определяется назначением электронного прибора, в котором используется ЗС. Для маломощных усилительных приборов это могут быть единицы или доли Вт. Для мощных усилителей и генераторов — до десятков кВт, при этом используются конструкции, обеспечивающие хороший теплоотвод, и применяются специальные меры охлаждения.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ГАРМОНИКИ. ТЕОРЕМА ФЛОКЕ

Большинство замедляющих систем конструктивно представляют собой структуры, периодически повторяющиеся вдоль продольной оси z .

Поле в ЗС в общем случае можно записать так:

$$E(x, y, z, t) = \text{Re } E(x, y, z) \exp(j\omega t), \quad (14)$$

где x, y, z — совокупность трех координат; $E(x, y, z)$ — функция, отображающая структуру поля в пространстве.

Сосредоточим внимание на исследовании зависимости амплитуды поля от пространственных координат, опуская при этом временную зависимость $[\exp(j\omega t)]$, то есть исследуем функцию

$$E(x, y, z). \quad (15)$$

Закономерности распределения волн в периодических структурах описываются теоремой Флоке. Она формулируется следующим образом [4]:

Среди решений уравнений электромагнитного поля для периодических замедляющих структур существует хотя бы одно такое частное решение («собственные волны»), при котором электромагнитные поля в поперечных сечениях, отстоящих друг от друга на пространственный период d , повторяют друг друга по форме и отличаются только фазовым множителем, то есть

$$E(x, y, z + d) \exp(j\varphi) = E(x, y, z), \quad (16)$$

где x, y — поперечные координаты; z — продольная координата; φ — фазовый сдвиг волны между соседними сечениями, находящимися на расстоянии d .

Будем рассматривать системы, периодичные лишь в одном направлении (z), и случай бегущих волн.

Умножим уравнение (16) почленно на $\exp(j\beta z)$, где $\beta = \varphi/d$, после чего получим функцию, которую обозначим E_0 , в следующем виде:

$$E_0(x, y, z) = E(x, y, z + d) \exp[j\beta(z + d)] = E(x, y, z) \exp(j\beta z). \quad (17)$$

Отсюда:

$$E(x, y, z) = E_0(x, y, z) \exp(-j\beta z). \quad (18)$$

Функция E_0 (17) для собственных волн в зависимости от координаты z является периодической. Поэтому ее можно представить в виде ряда Фурье как сумму гармонических составляющих, считая переменной координату z [4]:

$$E_0(x, y, z) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} E_m \cdot \exp(-j\beta_m z), \quad (19)$$

где сумма по m берется в бесконечных пределах от $-\infty$ до $+\infty$; $m = 0, \pm 1, \pm 2$, и т. д.; $\beta_m = \beta_0 + 2\pi m/d$; $\beta_0 = 2\pi/\Lambda$, Λ — длина волны в ЗС на основной гармонике; E_m — коэффициент разложения, соответствующий данному номеру гармоники m , он зависит от конфигурации ЗС и граничных условий:

$$E_m = \frac{1}{d} \int_0^d E(x, y, z) \exp(j\beta_m z) dz. \quad (20)$$

Каждое из слагаемых суммы (19):

$$E_m \exp(-j\beta_m z) \quad (21)$$

называют *пространственной гармоникой электромагнитного поля*. Амплитуду и фазу этих гармоник следует вычислять по формуле (20) с учетом граничных условий.

Существование пространственных гармоник является наиболее характерной особенностью периодических ЗС.

В последних выражениях, как указывалось, опущен множитель временной зависимости, но он подразумевается. Поэтому выражения отображают как бы «мгновенную во времени фотографию» электрического поля в системе.

Отметим основные свойства (1–5) пространственных гармоник.

1. Каждая гармоника имеет свою фазовую скорость распространения, определяемую формулой:

$$v_\varphi = \omega/\beta_m = \omega/(\beta_0 + 2\pi m/d), \quad (22)$$

где $m = 0; \pm 1; \pm 2$; и т. д.; β_0 — фазовая постоянная основной гармоники, имеющей наибольшую фазовую скорость.

Следовательно, при работе на выбранной гармонике обеспечивается свой коэффициент замедления ($n = c/v_\varphi$). Как видно из (6) и (22), при увеличении номера гармоники ее фазовая скорость уменьшается, соответственно уменьшается длина волны гармоники:

$$\Lambda_m = 2\pi/\beta_m, \quad (23)$$

коэффициент замедления n при этом увеличивается.

В зависимости от значения m фазовая скорость гармоник может быть как положительной, так и отрицательной.

При $m > 0$ (прямая волна) фазовая скорость гармоник положительна (направлена вправо), это *прямые* гармоники. Распространение волн происходит в направлении оси $+z$ (направление движения электронного луча). Направление фазовой и групповой скоростей совпадают. Энергия передается в направлении $+z$.

При $m < 0$ (обратная волна) фазовые скорости высших гармоник могут быть отрицательными (направлены влево),

это *обратные* гармоники. Распространение волн происходит в направлении $-z$. Фазовая и групповая скорости направлены при этом в противоположные стороны. Энергия передается в соответствии с групповой скоростью, то есть в направлении $+z$.

В электронных приборах используется работа, главным образом, на нулевой ($m = 0$), плюс первой ($m = +1$) и минус первой ($m = -1$) гармониках.

В ЛБВ применяются такие ЗС (в основном спирали при $m = 0$), в которых фазовая и групповая скорости направлены в одну сторону ($+z$), используется прямая волна. В таких приборах обратная связь отсутствует, и применяются они, как правило, в качестве усилителей.

В ЗС для ЛОВ фазовая и групповая скорости направлены навстречу друг другу ($m = -1$, используется обратная волна). При этом энергия, отдаваемая электронным потоком электромагнитному полю, распространяется навстречу движению электронов, за счет чего осуществляется обратная связь, необходимая для возникновения генерации. Такие ЗС, как правило, применяются в генераторных ЛОВ. Как видно, использование отрицательных гармоник здесь принципиально необходимо.

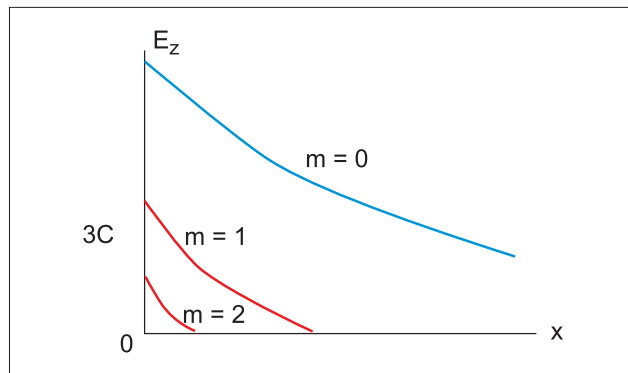
Работа на гармониках применяется и в ряде других случаев.

Так, в миллиметровом диапазоне работа на гармонике позволяет увеличить профиль замедляющей системы по сравнению с работой на нулевой гармонике, когда размеры оказываются очень малыми и возникают трудности при изготовлении.

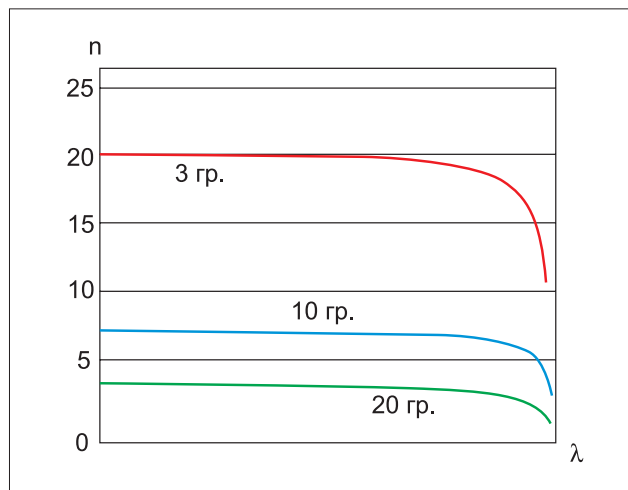
2. Все пространственные гармоники имеют одинаковую групповую скорость [3]:

$$v_{гр,m} = \partial\omega/\partial\beta_m = \partial\omega/\partial\beta_0 = V_{гр,0} \quad (24)$$

Это отражает тот факт, что процесс переноса энергии не связан с фазовыми скоростями той или иной гармоники.



▲ Рис. 5. Изменение амплитуд гармоник в поперечном сечении



▲ Рис. 6. Дисперсионная характеристика спиральной замедляющей системы

Направление переноса энергии совпадает с направлением фазовой скорости нулевой и высших прямых пространственных гармоник и, соответственно, является противоположным фазовой скорости обратных гармоник. Энергия всегда переносится в сторону направления групповой скорости.

3. Все пространственные гармоники имеют одинаковую частоту изменения во времени ω (14).

4. Амплитуды продольных составляющих электрического поля пространственных гармоник, как правило, уменьшаются с ростом их номера m [1]. Они спадают при удалении от поверхности периодической структуры ЗС (рис. 5). Поэтому при работе на гармониках электронный луч нужно пропускать на меньших расстояниях от замедляющей системы, что представляет известные технические трудности. В связи с этим обычно ограничиваются работой на нулевой и первых гармониках.

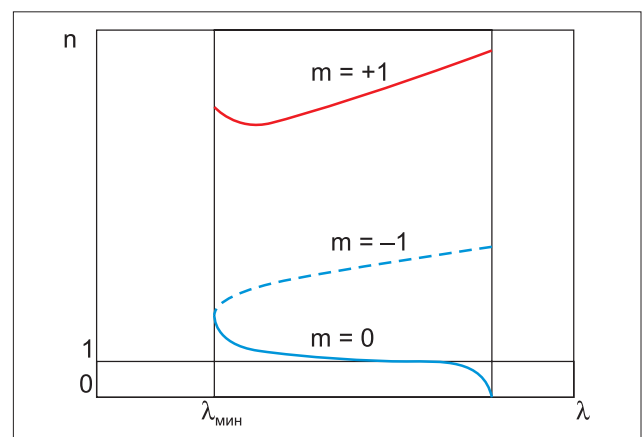
5. Объективно существование пространственных гармоник подтверждается экспериментальным путем. Зная расчетные значения фазовых скоростей гармоник, изменяют скорость прохождения луча мимо ЗС путем изменения напряжения на коллекторе прибора. При скоростях луча, совпадающих с расчетными значениями фазовых скоростей гармоник, наблюдается взаимодействие и усиление сигналов, что и является доказательством существования гармоник.

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

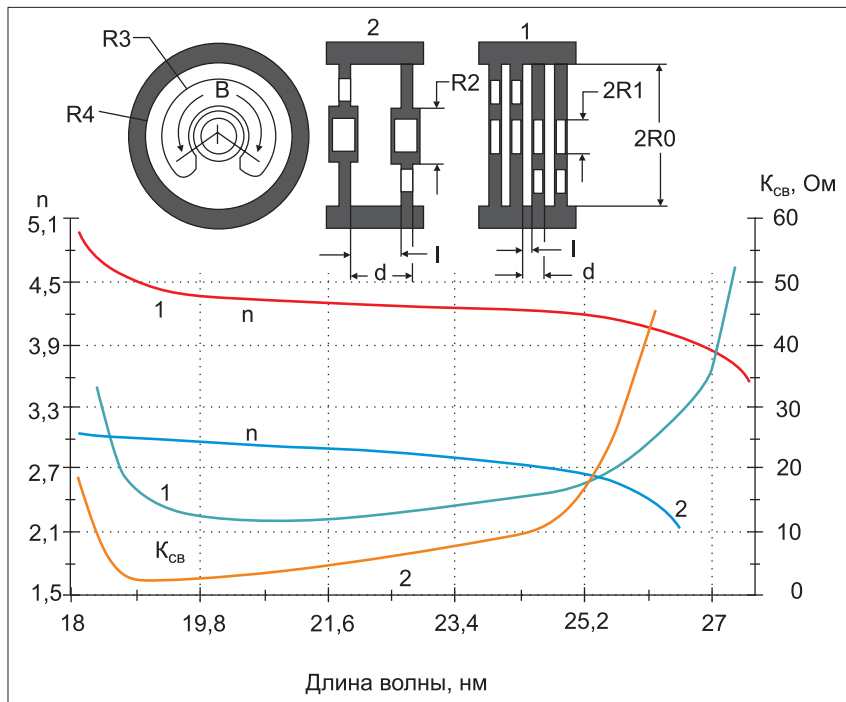
Как уже указывалось, одной из важных характеристик ЗС является дисперсионная характеристика — зависимость коэффициента замедления от частоты или длины волны. Дисперсионные характеристики имеют особенности, связанные с характером периодического изменения свойств конкретной системы вдоль координаты z .

Поле каждого типа волны, который может распространяться в ЗС, представляется, как уже отмечалось, в виде суммы бесконечного числа пространственных гармоник (m), одна из которых в конкретном приборе является рабочей.

Характерной особенностью периодических структур служит наличие двух частот отсечки: нижней ω_n и верхней ω_v , соответствующих значениям фазового сдвига $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$ (φ — сдвиг фазы в сечениях, отстоящих друг от друга на один пространственный период). Распространение волны в ЗС можно рассматривать как процесс последовательного ее отражения от неоднородностей (структур периодической системы) [3]. Поэтому при сдвигах фазы, указанных выше, все отраженные волны будут между собой в фазе, они согласованно сложатся и дадут волну в обратном направлении, а волна в прямом направлении будет отсутствовать. В интервале между частотами нижней ω_n и верхней ω_v волна распространяется с небольшим затуханием, обусловленным лишь активными потерями. Вне полосы пропускания затухание определяется в основном отражением и быстро увеличивается при отходе от граничных частот.



▲ Рис. 7. Дисперсионная характеристика гребенчатой замедляющей системы



▲ Рис. 8. Дисперсионная характеристика цепочки связанных резонаторов

Для построения дисперсионной характеристики необходимо в полосе пропускания знать зависимость $\varphi = \varphi(\omega)$. Эта зависимость определяется с помощью расчетов или экспериментов. Далее с помощью формул строятся дисперсионные характеристики.

Приведем для примера вид дисперсионных характеристик некоторых ЗС, полученных в результате уточненных расчетов или экспериментальным путем.

а). Дисперсионная характеристика реальной спиральной ЗС с учетом влияния причин, упомянутых ранее, приведена на рис. 6 [1]. По горизонтальной оси отложена длина волны.

Работа происходит на нулевом типе колебаний ($m = 0$).

Кривые построены для различных углов намотки спирали. Как видно из примера, в зависимости от этого коэффициент замедления на горизонтальной части характеристики изменяется от нескольких единиц до 20. При увеличении длины волны n уменьшается, что приближенной формулой не учитывалось.

При меньших длинах волн кривые практически горизонтальны, то есть дисперсия в широком диапазоне частот отсутствует. Коэффициент перекрытия, как указывалось, может составлять одну и более октав. Это важное достоинство спиральной ЗС. Она применяется, главным образом, в ЛБВ.

б). Вид дисперсионной характеристики гребенчатой ЗС приведен на рис. 7 [1].

Гребенчатая система на основной волне ($m = 0$) обладает нормальной положительной дисперсией, поскольку фа-

зовая скорость уменьшается с ростом частоты и направлена в сторону движения энергии. На сравнительно низких частотах замедление практически отсутствует. Замедление увеличивается при приближении к частоте, на которой имеется четвертьволновый резонанс щелей гребенки. Таким образом, при работе на основной волне замедление обеспечивается лишь в узкой полосе частот (район $\lambda_{\text{мин}}$).

В то же время замедление имеет большую величину при работе на гармониках при $m = +1$ и $m = -1$, что и используется на практике. Для удобства изображения характеристики отрицательных гармоник условно изображаются в положительной области и выделяются пунктиром.

Гребенчатые системы имеют большую дисперсию, чем ЗС спирального типа, что относится к их недостаткам.

Благодаря жесткости и хорошему теплоотводу гребенчатые ЗС технологически удобны и применяются в приборах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

в). На рис. 8 показаны экспериментальные дисперсионные характеристики цепочек, связанных щелями цилиндрических резонаторов (ЦСР) для однолучевой ЛБВ (рис. 4в), [4]. В простейшем случае эти резонаторы работают на типе колебаний E101.

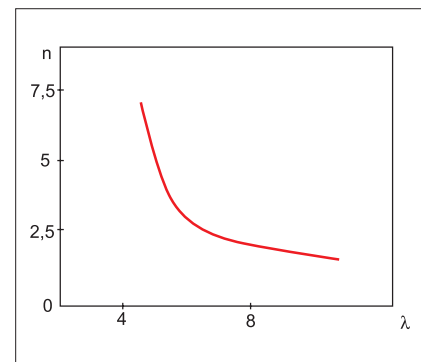
Кривые 1 соответствуют четырехступенчатой конструкции (4 перегородки) и изображают коэффициент замедления (n) и сопротивление связи ($K_{\text{св}} = R_{\text{св}}$); кривые 2 соответственно относятся к двухступенчатой (2 перегородки) конструкции.

Видно, что $R_{\text{св}}$ четырехступенчатых систем более чем вдвое выше, нежели у двухступенчатых. Коэффициент перекрытия по частоте K_{ω} составляет примерно 1,4 и позволяет создавать в соответствующей полосе частот ЛБВ на цепочках связанных резонаторов.

По конструкции, как видно из рисунка, четырехступенчатые системы проще двухступенчатых, поскольку не требуют трубок дрейфа. Это особенно важно для ЛБВ миллиметрового диапазона.

Цепочка из связанных резонаторов обладает большим сопротивлением связи, имеет жесткую конструкцию, хорошо отводит тепло, поэтому используется в мощных электронных приборах.

г). Дисперсионная характеристика резонансной системы магнетрона без связей (рис. 4д) показана на рис. 9 [4].



▲ Рис. 9. Дисперсионная характеристика замедляющей системы магнетрона без связей

Кольцевая конструкция ЗС обычно выполняется в массивном металлическом блоке и обеспечивает хороший теплоотвод. Поэтому замкнутые замедляющие системы применяются в мощных магнетронных генераторах и других приборах магнетронного типа: ЛБВ М-типа, лампах обратной волны (ЛОВ) М-типа, усилительных платинотронах (амплитронах). Общей особенностью приборов М-типа является присутствие в междоэлектродном пространстве скрещенных постоянных электрического и магнитного полей для формирования криволинейных (эпициклоида) траекторий электронов. ➔

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев И. В. *Техника и приборы СВЧ. Т. 1, 2. М: Высшая школа, 1970.*
2. Фальковский О. И. *Техническая электродинамика. М.: Связь, 1976.*
3. Григорьев А. Д. *Электродинамика и техника СВЧ. М: Высшая школа, 1980.*
4. Силин Р. А. *Периодические волноводы. М: ФАЗИС, 2002.*
5. Силин Р. А. *Курс лекций по дисциплине «Электродинамика и техника СВЧ». Фрязино, Филиал МИРЭА, Базовая кафедра 137, 2002.*