

СТНУ: 6  
ор 7.96

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

---

**ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА  
СПЕЦИАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ  
ЛАМПАМИ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

САМАРА 2003

СТАУ: 6  
Ф796

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

**ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА  
СПЕЦИАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ  
ЛАМПАМИ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

*Методические указания*

661382

**ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ**

обозначенного здесь срока


Самарский Государственный  
аэрокосмический университет  
№ 661382  
Научно-техническая  
библиотека

Составитель Г.И. Леонович

УДК 621.381

**Формирование и обработка специальных сигналов лампами бегущей волны: Метод. указания / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. Г.И. Леонович. Самара, 2003. 40 с.**

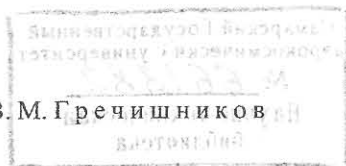
Методические указания представляют методическое обеспечение раздела "Прохождение специальных сигналов через радиотехнические цепи" программы дисциплины "Анализ и синтез сигналов специальной формы". Содержат материалы по изучению особенностей работы лампы бегущей волны в составе станций постановки помех при обработке и формировании специальных сигналов.

Предназначены для студентов четвертого курса радиотехнического факультета СГАУ (специальность 2007.00), готовящихся по контракту с ГУП НИИ "Экран".

Подготовлены на кафедре радиотехнических устройств.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Рецензент В. М. Гречишников



## СОДЕРЖАНИЕ

1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В РЕЖИМЕ УСИЛЕНИЯ.....	4
1.1. Общие сведения.....	4
1.2. Принцип действия ЛБВ.....	7
1.3. Энергетическое взаимодействие электронов с волной в ЛБВ.....	13
2. УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛОВ НА ЛБВ.....	17
2.1. Параметры и характеристики усилителя на ЛБВ.....	17
2.2. Особенности работы усилителя на ЛБВ.....	21
3. ПРИМЕНЕНИЕ ЛБВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОМЕХ.....	24
3.1. Характеристики усилителя на ЛБВ, используемого для фазовой модуляции сигналов.....	24
3.2. Гармоники и перекрестная модуляция в ЛБВ.....	28
3.3. Сдвиг частоты с помощью ЛБВ.....	30
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	38

Специальные шумовые и импульсные сигналы являются наиболее универсальными среди известных в настоящее время помеховых сигналов. Они обеспечивают принципиальную возможность маскировки полезных сигналов любой структуры и формы. В системах, формирующих специальные сигналы, очень важную роль играют лампы бегущей волны (ЛБВ), используемые в качестве генераторов и усилителей. Достоинствами ЛБВ являются широкая рабочая полоса частот и широкое разнообразие реализаций формирования и модуляции усиливаемого сигнала. В методических указаниях подробно освещаются ряд вопросов, связанных с применением ЛБВ в станциях помех: устройство, принцип действия, амплитудные характеристики, сдвиг частоты, фазовый сдвиг, взаимодействие одновременно усиливаемых сигналов, гармоники и т.д.

## 1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ В РЕЖИМЕ УСИЛЕНИЯ

### 1.1. Общие сведения

**Определение.** Лампой бегущей волны называют электронный прибор СВЧ диапазона, в котором используется длительное взаимодействие сгруппированного потока электронов, движущихся в продольных электрическом и магнитном полях, с прямой гармоникой сигнала (бегущей волной), распространяющейся вдоль замедляющей системы.

**Устройство.** Лампа бегущей волны (рис. 1.1) представляет собой длинную стеклянную колбу небольшого диаметра, в одном из концов

которой размещен ряд электродов (электронная пушка), предназначенных для образования узконаправленного пучка электронов. Электронная пушка обычно состоит из катода, управляющего электрода, одного или двух анодов. В зависимости от требуемой формы электронного пучка (цилиндрической или лентообразной) эти электроды могут отличаться по форме.

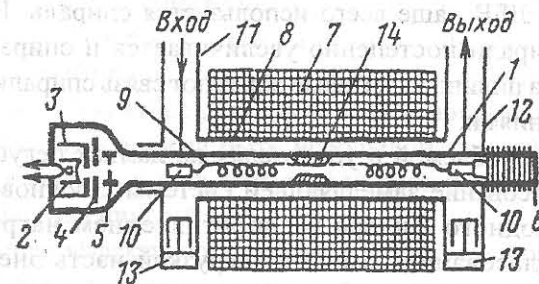


Рис. 1.1. Лампа бегущей волны:

- 1 - стеклянный баллон; 2 - катод; 3 - управляющий электрод; 4 - первый анод; 5 - второй анод; 6 - коллектор; 7 - фокусирующая катушка; 8 - металлический каркас катушки; 9 - спираль; 10 - цилиндры связи; 11 - входная коаксиальная линия; 12 - выходная коаксиальная линия; 13 - устройства согласования лампы с входом и выходом; 14 - поглотитель

В лампе электронный пучок цилиндрический. Катод выполнен в виде цилиндра, дно которого вогнутое, сферическое, покрыто оксидным слоем. Управляющий электрод и аноды выполняются в виде дисков с отверстиями или цилиндров с перегородками, снабженными в центре небольшими отверстиями — диафрагмами. Управляющий электрод играет роль управляющей сетки и находится обычно под небольшим отрицательным потенциалом, регулируя величину которого, можно изменять интенсивность электронного потока. На анод подается положительное напряжение. Вследствие разности потенциалов между управляющим электродом и анодом образуется система электростатических линз, обеспечивающая предварительное фокусирование электронного луча. В случае применения второго анода поле между ним и первым анодом также представляет собой электронную линзу. Таким образом, после второго

анода поток электронов оказывается сфокусированным в узкий цилиндрический луч, который затем мимо замедляющей системы движется к коллектору – положительно заряженному электроду, расположенному в противоположном конце лампы. Для окончательной фокусировки луча используется магнитное поле длинной катушки, намотанной на металлический каркас. Сама лампа помещается внутри этого соленоида. В качестве замедляющей системы в усилительных ЛБВ чаще всего используется спираль. В начале и конце шаг спирали постепенно увеличивается и спираль плавно переходит в два цилиндра, которые образуют связь спирали с входной и выходной линиями.

Серьезной проблемой в усилителях на лампах бегущей волны является согласование замедляющей системы с волновым сопротивлением входного фидера и сопротивлением нагрузки. При неполном согласовании лампы с нагрузкой часть энергии СВЧ колебаний отражается, появляется отраженная волна, движущаяся от выхода к входу, и возникает обратная связь. При выполнении условий баланса фаз, который при длинной замедляющей системе может легко удовлетворяться для ряда частот, в усилителе могут возникнуть автоколебания. Для исключения автоколебаний замедляющая система согласуется с входным и выходным фидерами. Обычно в усилителях на ЛБВ предусматриваются специальные устройства в виде короткозамкнутых отрезков волноводов или коаксиальных линий, включаемых параллельно входу и выходу. Длина таких отрезков может изменяться с помощью подвижных короткозамыкающих поршней. Входное сопротивление короткозамкнутой линии равно:

$$Z_{\text{вх}} = iW \cdot \operatorname{tg} \beta l, \quad (1.1)$$

где  $W$  – волновое сопротивление линии;  $\beta = 2\frac{\pi}{\lambda}$ ;

$l$  – длина отрезка линии.

Таким образом, с изменением длины  $l$  входное сопротивление параллельной линии меняется. По величине и знаку оно может быть подобрано таким, чтобы компенсировать рассогласование замедляющей системы с фидерной линией.

## 1.2. Принцип действия ЛБВ

СВЧ колебания, подлежащие усилению, поступают на вход лампы и далее распространяются вдоль замедляющей системы, образованной спиралью и каркасом фокусирующей катушки. Групповая скорость  $v_{\text{гр}}$  распространения электромагнитной волны вдоль провода, свернутого в спираль, равна скорости света. Фазовая скорость  $v_{\text{ф}}$  волны, т.е. скорость движения волны вдоль оси спирали, естественно, в  $\pi d/t$  раз меньше, где  $d$  – диаметр, а  $t$  – шаг спирали. Параметры спирали  $t$  и  $d$  выбирают такими, чтобы обеспечить нужное замедление (10...15-кратное), но дисперсия (зависимость фазовой скорости от частоты) должна быть небольшой, так как требуется равномерное усиление в широкой полосе частот при неизменном ускоряющем напряжении.

Для получения эффективного взаимодействия электронного потока с волной требуется примерно равенство фазовой скорости волны и скорости электронов. По мере движения внутри спирали в поле бегущей волны электроны взаимодействуют с этой волной. При входе в спираль, в зависимости от фазы сверхвысокочастотного электрического поля, электроны тормозятся или ускоряются полем. В результате разности скоростей электронов происходит их группирование в сгустки. При правильно выбранных скоростях движения электронов и волны сгустки образуются в той части бегущей волны, где электроны претерпевают торможение. Более подробно этот процесс будет рассмотрен ниже. Таким образом, при дальнейшем движении электроны постепенно тормозятся, передавая кинетическую энергию волне, амплитуда которой непрерывно увеличивается. В результате на выходе лампы амплитуда волны достигает величины, значительно превышающей амплитуду сигнала на входе.

**Электрическое поле в спирали.** Предположим, что на вход ЛБВ подано сверхвысокочастотное колебание с частотой  $\omega$ .

Расстояние, на которое перемещается волна вдоль оси спирали за один период колебаний, равно  $\lambda_{\text{в}}$ . Эта величина меньше длины  $\lambda$  волны в свободном пространстве в  $\pi d/t$  раз, так как скорость движения волны вдоль оси спирали  $v_{\text{ф}} = \frac{ct}{\pi d}$ . Обычно  $\lambda > \pi d$ , и



поэтому волна укладывается вдоль отрезка спирали, содержащего значительное количество ее витков.

Упрощенная картина сверхвысокочастотного электрического поля в замедляющей системе показана на рис. 1.2, а. Вдоль замедляющей системы, вблизи ее оси, движется сфокусированный в тонкий луч поток электронов. В той части спирали, где вектор  $\epsilon_z$  напряженности осевой составляющей совпадает по направлению с вектором  $v_0$  скорости электронов, поле для электронов тормозящее. И наоборот, там, где вектор  $\epsilon_z$  противоположен вектору  $v_0$ , поле ускоряет электроны (рис. 1.2, б).

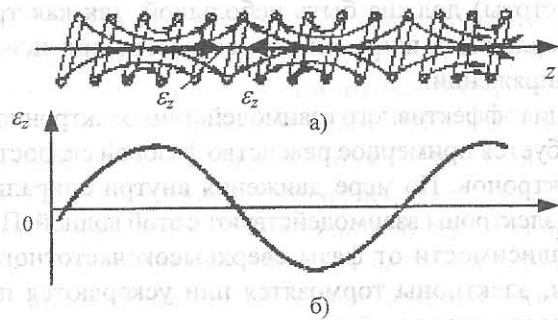


Рис. 1.2. Картина электрического поля в спиральной замедляющей системе (а) и зависимость  $\epsilon_z = f(z)$  (б)

**Графики движения электронов.** Построим график движения электронов относительно некоторой точки  $z$ , находящейся на оси спирали и движущейся вдоль оси со скоростью  $v_\phi$  перемещения волны. Предположим, что электроны не взаимодействуют с волной и перемещаются вдоль оси спирали с начальной скоростью

$$v_0 = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_0},$$

где  $e$  – заряд электрона;  $m$  – масса электрона;  $U_0$  – потенциал последнего анода.

Тогда в зависимости от соотношения  $v_0/v_\phi$  графики движения электронов изобразятся в виде прямых линий (рис. 1.3).

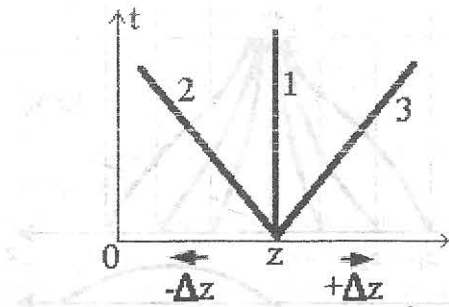


Рис. 1.3. Графики движения электронов без учета их взаимодействия с волной:

1 -  $v_0 = v_\phi$ ; 2 -  $v_0 < v_\phi$ ; 3 -  $v_0 > v_\phi$

Если  $v_0 = v_\phi$ , то электрон в любой момент времени находится против точки наблюдения  $z$  (график 1). Если  $v_0 < v_\phi$ , то с течением времени смещение  $\Delta z$  электрона относительно точки 2 увеличивается: электрон будет отставать от наблюдателя (график 2). При  $v_0 > v_\phi$  электрон постепенно опережает точку 2 и относительное смещение  $\Delta z$  имеет положительный знак (график 3).

На рис. 1.4, а, б, в изображены графики движения электронов, когда они взаимодействуют с бегущей вдоль оси волной.

На графиках выделены несколько точек наблюдения  $z_i$ , соответствующих разным моментам прихода электронов к началу спирали. Так, например, точка  $z_1$  соответствует электрону, который влетел в спираль в тот момент, когда поле было максимально ускоряющим; точка  $z_2$  – электрону, попавшему в спираль, когда  $\epsilon_z$  меньше максимальной величины, и т.д. Для большей наглядности графики движения электронов совмещены.

На рис. 1.4, а показаны графики движения электронов для случая  $v_0 = v_\phi$ . Пунктиром обозначено движение электронов, не взаимодействующих с волной. В результате взаимодействия электронов с полем бегущей волны графики их движения описываются кривыми линиями. Электроны, попавшие в ускоряющее поле, движутся все быстрее и постепенно опережают точку наблюдения. Электроны, попавшие в тормозящее поле, теряют скорость и отстают. В результате электроны группируются в сгустки в области, где  $\epsilon_z = 0$ .

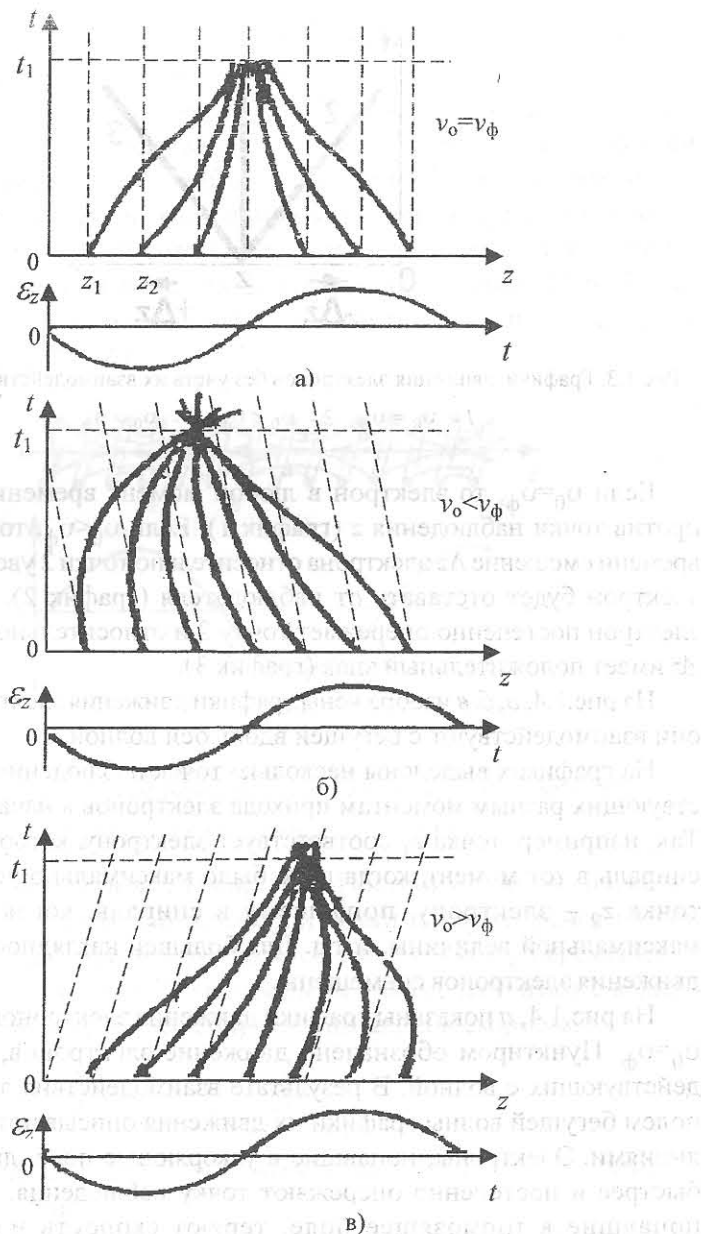


Рис. 1.4. Графики движения электронов с учетом их взаимодействия с волной:

а)  $v_0 = v_\phi$ ; б)  $v_0 < v_\phi$ ; в)  $v_0 > v_\phi$

Следовательно, при дальнейшем движении скорость электронов остается неизменной; электроны и поле не обмениваются энергией. Затрата энергии поля на группировку электронов также близка к нулю, так как плотность электронного потока у входа спирали не меняется со временем и, следовательно, поле ускоряет и замедляет за период равное число электронов.

На рис. 1.4, б и в показаны графики движения электронов при  $v_0 < v_\phi$  и  $v_0 > v_\phi$ . В первом случае сгусток электронов образуется в области ускоряющего поля. В процессе дальнейшего движения электроны отбирают энергию у поля, и амплитуда волны по мере ее распространения уменьшается. Это соотношение скоростей, как будет объяснено далее, является нерабочим.

Во втором случае электроны группируются в тормозящем поле волны. Дальнейшее их движение сопровождается потерей скорости и, следовательно, передачей энергии от электронного потока волне. Такое соотношение скоростей ( $v_0 > v_\phi$ ) характерно для рабочего режима лампы.

**Угол пролета.** Для характеристики совместного движения электронов и волны удобно использовать понятие об угле пролета электронов. Введем понятие об абсолютном угле пролета электрона

$$\Theta_e = \frac{z\omega}{v_0} \quad (1.2)$$

Эта величина характеризует время движения электрона на расстоянии  $z$  вдоль оси прибора, выраженное в долях периода СВЧ колебаний с частотой  $\omega$ . Угол  $\Theta_e$  называют абсолютным, так как он учитывает движение электрона в неподвижной системе координат безотносительно к движению волны. Скорость электрона  $v_e$  в общем случае может складываться из постоянной и переменной составляющих  $v_e = v_0 + v_-$ . Постоянная составляющая определяется величиной

ускоряющего потенциала:  $v_0 = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_0}$ , а переменная составляющая  $v_-$  — результат воздействия на электрон электрического поля волны.

Следовательно и абсолютный угол пролета электрона в общем случае должен содержать постоянную и переменную составляющие:

$$\Theta_e = \Theta_0 + \Theta_-, \quad (1.3)$$

где  $\Theta_0 = z\omega / v_0$  – абсолютный угол пролета невозмущенного электрона  $\Theta_-$  – изменение угла пролета электрона вследствие его взаимодействия с волной.

Знак и величина угла  $\Theta_-$  зависят от фазы волны в тот момент, когда электрон входит в спираль, а также от амплитуды волны.

Таким образом, в результате модуляции угла пролета электронов образуются сгустки. Это означает, что модуляция электронного потока по скорости приводит к модуляции по плотности.

В лампах бегущей волны вдоль замедляющей системы (по оси  $z$ ) движутся не только электроны, но и сама волна, электрическое поле которой оказывает воздействие на электронный поток по всей длине замедляющей системы. Поэтому будет удобно воспользоваться подвижной системой координат, перемещающейся вместе с волной, т.е. считать, что наблюдатель движется вместе с волной. В этом случае целесообразно ввести понятие *относительного угла пролета* электронов, т.е. смещения электронов относительно волны в процессе их совместного движения:

$$\varphi_e = \omega z \left( \frac{1}{v_e} - \frac{1}{v_\phi} \right). \quad (1.4)$$

Допустим, что в некоторый момент  $t_0$ , соответствующий входу электрона в спираль, фаза волны характеризуется величиной  $\psi$ . Если скорость электрона  $v_0 = v_\phi$  и он не взаимодействует с волной, то фаза волны относительно электрона во время его движения вдоль оси спирали остается неизменной и равной  $\psi$ . В этом случае относительный угол пролета  $\varphi_e = 0$ . Это условие называют *холодным синхронизмом*, подчеркивая словом “холодный” отсутствие взаимодействия электронов с волной.

Очевидно, что условие *холодного рассинхронизма* соответствует случаям, когда  $v_0 \neq v_\phi$ . Относительный угол пролета при этом может быть как отрицательным ( $v_0 > v_\phi$ ), так и положительным ( $v_0 < v_\phi$ ).

В реальных приборах поток электронов взаимодействует с волной, в результате чего изменяется скорость электронов: электроны ускоряются или замедляются электрическим полем волны. Взаимо-

действие электронов с волной не ограничивается только изменением скорости электронов. Как будет показано далее, при этом может меняться и скорость волны.

Таким образом, относительный угол пролета, так же как и абсолютный, складывается из постоянной и переменной составляющих:

$$\varphi_e = \varphi_0 + \varphi. \quad (1.5)$$

В (1.5) угол  $\varphi_0$  определяет смещение электрона относительно волны вследствие отличия его начальной скорости  $v_0$  от фазовой скорости волны. Величина угла  $\varphi$  определяется степенью торможения или ускорения электрона волной, а также возможным в результате взаимодействия изменением скорости волны.

Условия, при которых  $\varphi_e = 0$ , т.е.  $v_e = v_\phi$ , называют *горячим синхронизмом*.

Как видно из (1.2)-(1.4), абсолютный и относительный углы пролета связаны между собой соотношением:

$$\varphi_e = \left( 1 - \frac{v_0}{v_\phi} \right) \Theta_e = \delta \Theta_e. \quad (1.6)$$

### 1.3. Энергетическое взаимодействие электронов с волной в ЛБВ

Вследствие модуляции электронного потока по скорости электронный ток содержит переменную составляющую, характеризующую в случае малых возмущений гармоническим законом. Средняя за период мощность  $dP$  взаимодействия электронов с волной на пути  $z$  определяется в этом случае выражением

$$dP = \frac{1}{2} \int_0^z I_{e_m} \varepsilon_{z_m} dz, \quad (1.7)$$

где  $I_{e_m}$  – амплитуда переменной составляющей конвекционного тока

$i = \frac{d}{dt}(ne)$ ;  $\varepsilon_{z_m}$  – амплитуда напряженности поля.

Знак перед величиной  $dP$  зависит от фазовых соотношений между током  $i$  и полем  $\varepsilon_z$ . В случае их синфазности электроны ускоряются



полем и мощность  $dP$  положительная. При противоположных фазах мощность  $dP$  отрицательная: электроны передают энергию волне.

В общем случае переменная составляющая электронного тока и напряженность поля волны могут отличаться по фазе на любую величину. Разность фаз зависит не только от различия начальных скоростей  $v_e$  и  $v_{\phi 0}$ , но и от степени горячего рассинхронизма, т.е. от различия скоростей  $v_e$  и  $v_{\phi}$ . Поэтому величина и знак мощности взаимодействия существенно зависят от величины относительного угла пролета  $\varphi_e$ . Иначе говоря, в общем случае мощность взаимодействия — величина комплексная и, следовательно, можно выделить ее активную  $P_a$  и реактивную  $P_r$  части.

На рис. 1.5 представлены зависимости активной и реактивной составляющих мощности взаимодействия от относительного угла пролета  $\varphi_0$ , меняющегося вследствие изменения  $v_{\phi}$  и при постоянстве всех других величин.

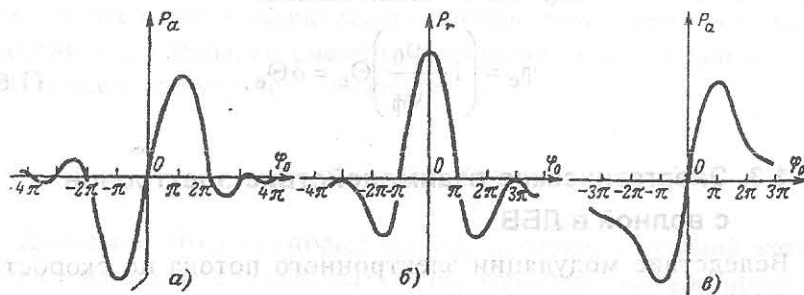


Рис. 1.5. Зависимость активной и реактивной мощности от величины относительного угла пролета: а и б — при неизменной амплитуде волны; в — при экспоненциально-нарастающей волне

Кривая на рис. 1.5, а подтверждает справедливость сделанного в п. 1.1 качественного рассмотрения условий энергетического обмена между электронами и волной. При положительных углах пролета ( $\varphi_0 > 0$ ), т.е. когда  $v_0 < v_{\phi}$ , активный компонент мощности взаимодействия положителен, электроны группируются в области ускоряющего поля и отбирают у него энергию. Когда  $\varphi_0 < 0$ , что отвечает условию  $v_0 > v_{\phi}$ , мощность  $P_a$  отрицательна. В этом случае сгустки электронов формируются в тормозящей фазе поля и, претерпевая торможение при дальнейшем движении в поле волны,

передают ему энергию. Экстремум кривой  $P_a = f(\varphi_0)$  соответствует величине угла  $\varphi_0 = \pi$ . Это означает, что наиболее эффективная передача энергии от электронов полю достигается в том случае, когда на пути взаимодействия электронный сгусток все время остается в тормозящем полупериоде волны. Формируясь в начале тормозящего полупериода, сгусток за время совместного движения с волной смещается к концу этого полупериода, претерпевая все время торможение за счет действия сил поля.

В условиях холодного синхронизма ( $v_0 = v_{\phi 0}$ ) мощность  $P_a = 0$ . Это означает, что сгустки электронов формируются в той области, где  $\varepsilon_z \approx 0$ , и не должны обмениваться энергией с полем волны. Однако, как видно из рис. 1.5, б, в этом случае максимальна реактивная мощность взаимодействия  $P_r$ . При этом электронные сгустки при своем движении образуют конвекционный ток с такой фазой, что соответствующее ему электрическое поле сдвинуто по фазе относительно поля волны на угол  $\pi/2$ . Анализ этих процессов показывает, что при  $P_r > 0$  фазовая скорость движения волны уменьшается, сгустки электронов постепенно смещаются в область тормозящего поля и развивается процесс передачи энергии от электронов волне. Таким образом, в условиях холодного синхронизма ( $v_0 = v_{\phi 0}$ ) энергетический обмен между электронами и волной не прекращается, а за счет изменения фазовой скорости возмущенной волны будет происходить передача энергии от электронов волне. Нарушение этого энергообмена, т.е. изменение знака мощности  $P_a$ , произойдет лишь при достаточно сильном холодном рассинхронизме ( $v_0 \ll v_{\phi 0}$ ).

Кривые на рис. 1.5, а, б построены в предположении, что амплитуда волны при ее движении вдоль замедляющей системы остается неизменной. В действительности же при работе ЛБВ в усилительном режиме амплитуда волны по мере получения энергии от электронного потока существенно увеличивается.

На рис. 1.6 показано изменение амплитуды продольной составляющей поля волны  $\varepsilon_{z_m} = f(z)$ , нарастающей в результате получения энергии от электронов по экспоненциальному закону. На этом же рисунке дана кривая изменения амплитуды переменной составляющей плотности электронного потока  $I_{z_m} = f(z)$ .

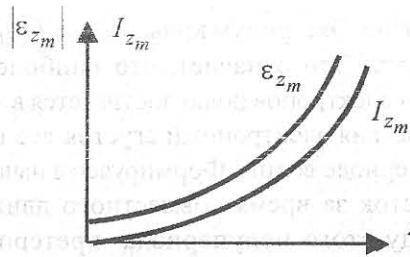


Рис. 1.6. Зависимость амплитуды суммарной волны и переменной составляющей электронного потока от координаты  $z$  в ЛБВ

Кривая  $P_a = f(\varphi_0)$  для случая нарастающей по экспоненциальному закону волны показана на рис. 1.5, в. Характер зависимости остается прежним, лишь несколько расширяется диапазон углов  $\varphi_0$ , при которых наблюдается эффективный обмен энергией между электронами и волной. Электроны отдают волне значительную энергию даже тогда, когда относительный угол пролета  $\varphi_0$  существенно отличается от  $\pi$ . Величина этого угла при  $v_0 = \text{const}$  определяется фазовой скоростью волны. Следовательно, положительный энергетический баланс выполняется при усилении колебаний в достаточно широком диапазоне изменения частоты при условии, что дисперсия замедляющей системы невелика.

Таким образом, в ЛБВ электроны взаимодействуют с волной на весьма длинном отрезке пути в процессе их совместного движения вдоль замедляющей системы. Использование в ЛБВ нерезонансных замедляющих систем делает эти приборы весьма широкополосными, сохраняющими высокую величину коэффициента усиления в широком диапазоне частот.

В ЛБВ для эффективного взаимодействия электронного потока с волной требуется определенная величина относительного угла пролета ( $\varphi_0 \approx \pi$ ). Абсолютный угол  $\Theta_0$  пролета может быть сколько угодно велик, причем с увеличением  $\Theta_0$  или, что то же самое, с увеличением длины замедляющей системы улучшаются условия группирования электронов и возрастает энергия, передаваемая волне.

## 2. УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛОВ НА ЛБВ

### 2.1. Параметры и характеристики усилителя на ЛБВ

**Коэффициент усиления** – один из основных параметров ЛБВ – обычно выражается в децибелах:

$$K_p = 10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \text{ дБ.} \quad (2.1)$$

Имея в виду, что усиление в ЛБВ происходит за счет передачи энергии электронами волне, коэффициент усиления можно также записать в виде:

$$K_p = 20 \lg \frac{\varepsilon_{z_{M1}}}{\varepsilon_{z_{M0}}} \text{ дБ,} \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_{z_{M1}}$  и  $\varepsilon_{z_{M0}}$  – амплитуды продольной составляющей волны на входе и выходе замедляющей системы соответственно.

Эти величины связаны между собой соотношением:

$$\varepsilon_{z_{M1}} = \varepsilon_{z_{M0}} e^{\alpha l}, \quad (2.3)$$

где  $l$  – длина замедляющей системы;

$$\alpha = -\frac{\sqrt{3} \omega C}{2v_{\varphi 0}}, \quad (2.4)$$

а  $C = 3 \sqrt{\frac{R_c I_0}{4U_0}}$  – безразмерная величина, называемая **параметром усиления**.

Подставляя (2.3) в (2.2), получим:

$$K_p = 20 \lg e^{\alpha l} = 20 \alpha l \lg e \approx 8,68 \alpha l, \text{ дБ} \quad (2.6)$$

Подставляя в (2.6) соотношение (2.4) и имея в виду, что  $\omega = v_{\varphi 0} = 2\pi c / \lambda v_{\varphi 0} = 2\pi / \lambda_v$ , запишем (2.2) в виде:

$$K_p = 47,3 \frac{Cl}{\lambda_B} = 47,3 CN \text{ дБ}, \quad (2.7)$$

$$\text{где} \quad N = \frac{l}{\lambda_B} \quad (2.8)$$

– число длин волн, укладываемых по всей длине замедляющей системы.

По мере распространения волны вдоль замедляющей системы неизбежны потери энергии. Величина этих потерь соответствует 1/3 амплитуды волны на входе спирали. Поэтому из величины коэффициента усиления необходимо вычесть эти потери:

$$L_0 = 20 \lg \frac{1}{3} = -9,54 \text{ дБ}. \quad (2.9)$$

В результате выражение (2.7) принимает вид:

$$K_p = 47,3 CN - 9,54 \text{ дБ}. \quad (2.10)$$

Коэффициент усиления серийных отечественных и зарубежных ЛБВ достигает величины 30...60 дБ.

**Выходная мощность** служит важным параметром в случае использования ЛБВ в качестве оконечных усилителей мощности.

Величину  $P_{\text{вых}}$  можно определить как мощность, развиваемую волной на выходе лампы на сопротивлении  $R_c$ :

$$P_{\text{вых}} = \frac{\varepsilon^2 z_{m1}}{2R_c}. \quad (2.11)$$

Отсюда следует, что получение высоких выходных мощностей требует прежде всего мощного электронного потока, обладающего большим запасом кинетической энергии. Мощные выходные ЛБВ способны обеспечить на выходе мощность порядка 10 кВт в непрерывном и более 10 МВт в импульсном режиме.

**Электронный коэффициент полезного действия.** Теоретическое значение максимального электронного к.п.д. легко получить из выражений (2.5) и (2.11):

$$\eta_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0} = 2C. \quad (2.12)$$

Из анализа выражений (2.5) и (2.12) легко заключить, что для повышения  $\eta_{\text{эл}}$  требуется увеличивать  $R_c$ , повышать величину тока  $I_0$  и по возможности уменьшать  $U_0$ . В реальных ЛБВ  $\eta_{\text{эл}}$  обычно невелик: единицы процентов для ламп миллиметрового диапазона и 20–35% для ЛБВ, работающих в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн.

Электронный к.п.д. может быть увеличен за счет режима рекуперации, для чего на коллектор подается напряжение ниже напряжения  $U_0$ . При этом часть мощности источника питания, затраченной на ускорение электронов, возвращается электронами при их торможении полем коллектора.

**Полоса рабочих частот.** Усилители на ЛБВ выгодно отличаются от других (например, клистронных) усилителей возможностью усиления сигналов в широкой полосе частот. Это достоинство – результат использования в лампах бегущей волны нерезонансных колебательных систем, обладающих достаточно слабой дисперсией.

Типичная амплитудно-частотная характеристика ЛБВ показана на рис.1.7.

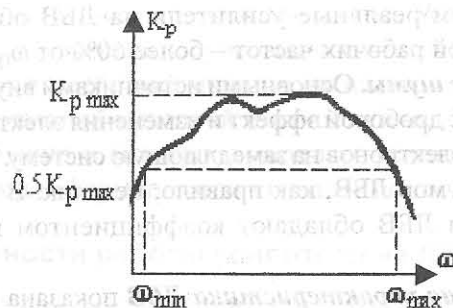


Рис.1.7. Амплитудно-частотная характеристика ЛБВ

Полоса рабочих частот ( $\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}$ ), как и для любого усилителя, оценивается для ЛБВ по допустимому (обычно 3 дБ) спаду коэффициента усиления при изменении частоты сигнала относительно средней, расчетной частоты. Спиральные замедляющие системы, используемые в ЛБВ, характеризуются, как правило, очень слабой



дисперсией, так что нарушение условия синхронизма за счет изменения фазовой скорости волны при изменении частоты практически слабо влияет на процесс усиления.

Снижение коэффициента усиления на частотах ниже рабочей обусловлено, в частности, увеличением длины волны  $\lambda_v$  в замедляющей системе и уменьшением вследствие этого параметра  $N$  (2.8).

С увеличением частоты сигнала высокочастотное поле как бы прижимается к виткам спирали, амплитуда его вблизи оси падает и взаимодействие электронов с волной становится менее эффективным.

На величину полосы рабочих частот влияют, кроме того, и условия согласования замедляющей системы с входом и выходом лампы. Согласующие устройства обладают собственным частотным диапазоном, ширина которого относительно невелика. Это обстоятельство не только ограничивает общую полосу рабочих частот, но и приводит зачастую к немонотонности частотной характеристики в пределах рабочего диапазона. Допустимые отклонения коэффициента усиления от среднего, номинального значения в пределах полосы рабочих частот не должны превышать 3 дБ.

Вместе с тем реальные усилители на ЛБВ обладают весьма широкой полосой рабочих частот – более 60% от  $\omega_0$ .

**Внутренние шумы.** Основными источниками внутренних шумов в ЛБВ являются: дробовой эффект и изменения электронного тока за счет попадания электронов на замедляющую систему. Однако уровень собственных шумов ЛБВ, как правило, невелик. В сантиметровом диапазоне волн ЛБВ обладают коэффициентом шума не выше 4-6 дБ.

**Амплитудная характеристика ЛБВ** показана на рис.1.8. При малых уровнях входного сигнала коэффициент усиления имеет наибольшую величину и в диапазоне  $P_{вх2} - P_{вх1}$ , называемом динамическим диапазоном, остается практически неизменным. В этой области работают обычно входные усилители на ЛБВ. Величина

динамического диапазона в ЛБВ  $\left( 10 \lg \frac{P_{вх2}}{P_{вх1}} \right)$  достигает 80-90 дБ.

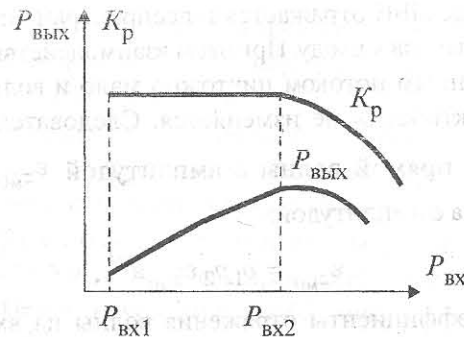


Рис.1.8. Амплитудная характеристика ЛБВ

С увеличением входной мощности коэффициент усиления монотонно уменьшается, и при очень больших  $P_{вх}$  усилитель практически превращается в ослабитель, так как взаимодействие волны с электронным потоком ухудшается. Волна, двигаясь вдоль замедляющей системы, содержащей поглотитель, уменьшается по амплитуде. Это свойство лампы имеет существенное практическое значение, если ЛБВ используется в качестве входного усилителя чувствительного радиолокационного приемника. Усилитель на ЛБВ защищает преобразователь на полупроводниковом диоде в приемнике от нежелательных воздействий мощных сигналов.

Режим максимальной выходной мощности и наибольшего к.п.д. используется обычно в мощных выходных усилителях на ЛБВ, предназначенных для формирования сигналов помех.

## 2.2. Особенности работы усилителя на ЛБВ

**Подавление самовозбуждения в ЛБВ.** В самом начале рассмотрения работы ЛБВ было предположение, что замедляющая система нагружена на сопротивление, равное волновому сопротивлению линии, а отражения при этом в линии отсутствуют. В действительности же добиться идеального согласования лампы с нагрузкой, даже если используются специальные согласующие устройства, практически невозможно. Особенно трудно получить хорошее согласование в широком диапазоне частот. Поэтому часть

энергии на выходе ЛБВ отражается и распространяется в обратном направлении от выхода к входу. При этом взаимодействие отраженной волны с электронным потоком ничтожно мало и волна в обратном направлении фактически не изменяется. Следовательно, на входе лампы, помимо прямой волны с амплитудой  $\varepsilon_{z_{m0}}$ , появляется отраженная волна с амплитудой:

$$\varepsilon_{z_{m0}} = p_1 p_2 \varepsilon_{z_{m0}} e^{\alpha l}, \quad (2.13)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – коэффициенты отражения волны на входе и выходе соответственно.

В результате отражения волны от выхода в усилителе появляется цепь положительной обратной связи. При необходимых фазовых

условиях, легко выполняющихся на ряде частот (так как  $N = l/\lambda_{в}$

велико), а также при условии, что  $p_1 p_2 e^{\alpha l} > 1$ , в ЛБВ возможно самовозбуждение.

Необходимое для подавления самовозбуждения поглощение обеспечивается в ЛБВ либо за счет использования спирали из материала с достаточно большим удельным сопротивлением, либо путем введения в замедляющую систему специальной поглощающей вставки. Эта вставка, представляющая собой небольшой цилиндр, охватывающий спираль, располагается обычно вблизи середины замедляющей системы. Края такого цилиндра скашивают для уменьшения отражений от самой вставки. Затухание поглощающей вставки может быть весьма существенным, так что и прямая и отраженная волны почти полностью затухают. Однако электронный луч, модулированный по плотности, вновь наводит во второй половине замедляющей системы прямую волну, амплитуда которой быстро нарастает за счет отбора кинетической энергии электронных ступков.

Если потери мощности в поглотителе обозначить через  $L$ , то выражение (2.10) для коэффициента усиления по мощности можно записать в виде:

$$K_p = 47,3CN - 9,54 - L \text{ дБ}. \quad (2.14)$$

Из (2.14) видно, что для повышения коэффициента усиления необходимо стремиться к увеличению параметра  $C$  (т.е. обеспечить по возможности большую величину  $R_c$  и увеличивать ток  $I_0$ ) и длины  $l$  замедляющей системы. Однако при слишком большой длине спирали в ее конце ухудшаются условия передачи энергии от электронов волне; электроны теряют свою скорость, попадают в ускоряющую фазу поля и рост амплитуды волны замедляется. В реальных ЛБВ  $C \approx 0,02 \div 0,5$ ;  $N$  выбирается равным 10–30, а величина  $L \approx 4 \div 10$  дБ. При этих условиях коэффициент усиления достигает значения 30–40 дБ.

Характеристика взаимодействия представлена на рис. 1.9.

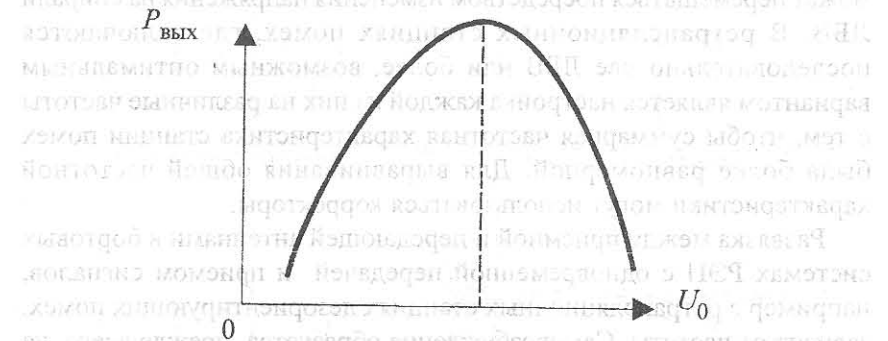


Рис. 1.9. Характеристика взаимодействия ЛБВ

Как видно из этой кривой, выходная мощность достигает максимальной величины при некотором оптимальном напряжении на замедляющей системе, при котором соотношение скорости электронов и фазовой скорости волны соответствует наилучшим условиям передачи энергии от электронов волне. Относительно пологий характер кривой  $P_{\text{ВЫХ}} = f(U_0)$  в районе максимума свидетельствует о невысокой чувствительности ЛБВ к изменениям напряжения  $U_0$ , нестабильность которого допустима в пределах  $\pm 1\%$ .



### 3. ПРИМЕНЕНИЕ ЛБВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОМЕХ

#### 3.1. Характеристики усилителя на ЛБВ, используемого для фазовой модуляции сигналов

Благодаря широкой рабочей полосе частот и разнообразным возможностям модуляции усиливаемого сигнала, ЛБВ находят широкое применение в системах РЭП [7].

На рис. 3.1, а приведена зависимость коэффициента усиления ЛБВ от частоты. Изображены две кривые: одна для слабых сигналов и другая для режима насыщения. Обе кривые обнаруживают максимум усиления в центре полосы пропускания ЛБВ, достигающей многих децибел. В пределах рабочего диапазона этот максимум может перемещаться посредством изменения напряжения на спирали ЛБВ. В ретрансляционных станциях помех, где включаются последовательно две ЛБВ или более, возможным оптимальным вариантом является настройка каждой из них на различные частоты с тем, чтобы суммарная частотная характеристика станции помех была более равномерной. Для выравнивания общей частотной характеристики могут использоваться корректоры.

Развязка между приемной и передающей антеннами в бортовых системах РЭП с одновременной передачей и приемом сигналов, например в ретрансляционных станциях дезориентирующих помех, зависит от частоты. Самовозбуждение образуется, прежде всего, на той частоте, на которой коэффициент усиления системы с учетом потерь из-за развязки достигает максимального значения. Самовозбуждение нарушает работу станции помех, поэтому его необходимо избегать или, по крайней мере, контролировать. Легче всего такой контроль осуществляется при равномерной частотной характеристике ретранслятора.

На рис. 3.1, б представлены амплитудные характеристики ЛБВ для трех различных частот: средней, нижней и верхней, которые соответствуют значениям по оси абсцисс на графике, представленном на рис. 3.1, а. Мощность сигнала при насыщении изменяется в некоторых пределах, обозначенных величиной  $d$ . Начиная с уровня мощности слабых сигналов на входе ЛБВ до уровня сигналов, вызывающих насыщение, режим усиления ЛБВ остается почти линейным.

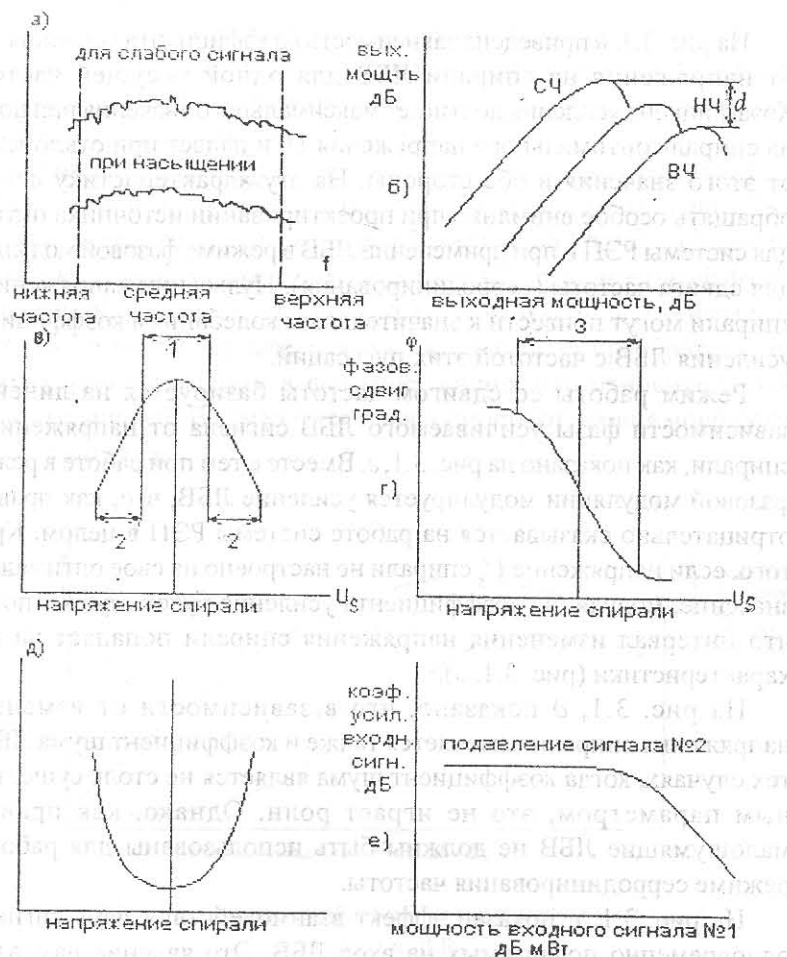


Рис. 3.1. Основные характеристики ЛБВ: а – зависимость усиления; б – амплитудная характеристика; в – зависимость коэффициента усиления от напряжения на спирали; г – характеристика серродинирования; д – зависимость коэффициента шума от напряжения на спирали; е – взаимодействие при усилении двух сигналов.

1 – рекомендуемая область изменения напряжения спирали в режиме серродинирования частоты; 2 – нерекомендуемая область изменения напряжения спирали при работе в режиме серродинирования частоты; 3 – область изменения напряжения спирали при работе в режиме серродинирования частоты

На рис. 3.1, в приведена зависимость коэффициента усиления ЛБВ от напряжения на спирали ЛБВ для одной несущей частоты. Коэффициент усиления достигает максимального значения при подаче на спираль оптимального напряжения  $U_s$  и падает при отклонениях от этого значения в обе стороны. На эту характеристику следует обращать особое внимание при проектировании источника питания для системы РЭП и при применении ЛБВ в режиме фазовой модуляции для сдвига частоты (серродинирования). Пульсации напряжения на спирали могут привести к значительным колебаниям коэффициента усиления ЛБВ с частотой этих пульсаций.

Режим работы со сдвигом частоты базируется на линейной зависимости фазы усиливаемого ЛБВ сигнала от напряжения на спирали, как показано на рис. 3.1, г. Вместе с тем при работе в режиме фазовой модуляции модулируется усиление ЛБВ, что, как правило, отрицательно сказывается на работе системы РЭП в целом. Кроме того, если напряжение  $U_s$  спирали не настроено на свое оптимальное значение, модуляция коэффициента усиления будет глубже, потому что интервал изменения напряжения спирали попадает на спад характеристики (рис. 3.1, в).

На рис. 3.1, д показано, что в зависимости от изменения напряжения спирали изменяется также и коэффициент шума ЛБВ. В тех случаях, когда коэффициент шума является не столь существенным параметром, это не играет роли. Однако, как правило, малошумящие ЛБВ не должны быть использованы для работы в режиме серродинирования частоты.

На рис. 3.1, е показан эффект взаимодействия двух сигналов, одновременно подаваемых на вход ЛБВ. Это явление называется также подавлением сигнала. Пусть входной сигнал № 2 постоянного уровня подается непрерывно на вход ЛБВ. Уровень непрерывного входного сигнала № 1 другой частоты плавно увеличивается. Когда уровни обоих сигналов малы, они усиливаются независимо друг от друга. По мере возрастания уровня сигнала № 1 усиление второго сигнала начнет, как показано на графике, уменьшаться вследствие насыщения. Если уровни двух входных сигналов будут такими, что каждый из них по отдельности вызвал бы насыщение, то на выходе уровень каждого из них составит половину уровня мощности

насыщения. Сказанное справедливо как в отношении непрерывных сигналов, так и в отношении совпадающих импульсных сигналов. На практике снижение уровня мощности сигнала в результате взаимодействия в ЛБВ может достигать 15 дБ.

Графики зависимости входной мощности и фазового сдвига от уровня входной мощности для типовой ЛБВ приведены на рис. 3.2. Ордината слева относится к кривой, обозначенной “фаза”, а ордината справа – к кривой, обозначенной “мощность”. Относительный фазовый сдвиг соответствует разности фаз входного и выходного сигналов. По характеристике, называемой характеристикой преобразования амплитудной модуляции в фазовую, видно, что относительный фазовый сдвиг в ЛБВ изменяется в зависимости от уровня мощности входного сигнала.



Рис. 3.2. Характеристика преобразования амплитудной модуляции в фазовую в ЛБВ

При малой мощности входного сигнала это изменение незначительно, но при уровнях от 10 до 5 дБ ниже уровня насыщения фазовый сдвиг быстро увеличивается и может достигать значений порядка  $50^\circ$ . Преобразование амплитудной модуляции в фазовую является результатом уменьшения скорости электронного пучка при увеличении уровня входного сигнала, потому что в этом случае увеличивается энергетическое взаимодействие между пучком и входным СВЧ-сигналом. Характеристики преобразования амплитудной модуляции в фазовую играют важную роль в тех системах

РЭП, где осуществляется управление фазы СВЧ-сигнала, например в системах с активными антенными решетками, а также в системах создания когерентных и поляризационных помех моноимпульсным РЛС.

### 3.2. Гармоники и перекрестная модуляция в ЛБВ

Как любой нелинейный прибор ЛБВ генерирует составляющие побочных частот, под которыми подразумевается либо образование гармоник входных сигналов, либо появление составляющих перекрестной модуляции. Для ЛБВ с полосой пропускания в октаву или более гармоники играют существенную роль, если несущие частоты входных сигналов располагаются в нижней части этой полосы. В этом случае гармоники попадут в верхнюю часть полосы пропускания, где большое усиление. В условиях насыщения гармоники отбирают часть высокочастотной мощности и выходная мощность ЛБВ на рабочей частоте входного сигнала снижается. Подобным же образом сказывается воздействие составляющих перекрестной модуляции. На рис. 3.3 показаны гармоники и составляющие перекрестной модуляции, которые образуются в ЛБВ с полосой пропускания 5-11 ГГц, когда на ее вход подаются два сигнала с частотами  $f_1 = 5,0$  ГГц и  $f_2 = 6,0$  ГГц. В табл. 3.1 показано, как рассчитываются частоты паразитных сигналов. В рассматриваемом случае расчет ограничен составляющими перекрестной модуляции пятого порядка, однако возможны составляющие и более высоких порядков. Звездочками отмечены частоты сигналов, попадающие в полосу пропускания ЛБВ.



Рис. 3.3. Спектральные составляющие при перекрестной модуляции в ЛБВ

Таблица 3.1

Значения спектральных составляющих при перекрестной модуляции в ЛБВ (б)

Порядок составляющих	Частота, ГГц	Значимость	
Вторая гармоника	$2F_1$	10	Высокая*
То же	$2F_2$	12	Средняя
Составляющая второго порядка	$F_1 + F_2$	11	Высокая*
То же	$F_1 - F_2$	1	Низкая
Составляющая третьего порядка	$2F_1 + F_2$	16	Низкая
То же	$2F_1 - F_2$	4	Средняя
— // —	$2F_2 + F_1$	17	Низкая
— // —	$2F_2 - F_1$	7	Высокая*
Составляющая четвертого порядка	$2F_2 + 2F_1$	2	Средняя
То же	$3F_1 + F_2$	4	Низкая
— // —	$3F_1 - F_2$	9	Высокая*
— // —	$3F_2 + F_1$	23	Низкая
— // —	$3F_2 + F_1$	13	Средняя
— // —	$2F_1 + 2F_2$	22	Низкая
Составляющая пятого порядка	$3F_1 + 2F_2$	27	Низкая
То же	$3F_1 - 2F_2$	3	Средняя
— // —	$3F_2 + 2F_1$	28	Низкая
— // —	$3F_2 - 2F_1$	8	Высокая*

Попавшие в полосу пропускания ЛБВ паразитные сигналы будут усиливаться. К сигналам средней значимости относятся сигналы, попадающие в пределы 3 ГГц рабочей полосы пропускания ЛБВ, где усиление ЛБВ все еще может быть значительным. Если эти сигналы оказывают отрицательное воздействие на работу системы РЭП, они могут быть подавлены с помощью фильтров. Частоты сигналов низкой значимости столь далеко отстоят от рабочей полосы пропускания ЛБВ, что эти сигналы не оказывают существенного влияния на работу системы РЭП, но должны учитываться при решении проблемы электромагнитной совместимости. Влияние гармоник и составляющих перекрестной модуляции повышается, когда уровень входного сигнала вызывает насыщение ЛБВ с полосой пропускания, значительно превышающей октаву.



### 3.3. Сдвиг частоты с помощью ЛБВ

Процесс сдвига несущей СВЧ сигнала  $f_i$  состоит в изменении ее в сторону увеличения или уменьшения с помощью управляемого фазовращателя; в частности, частота выходного сигнала будет  $f_i + f_s$ , когда частота пилообразного ФМ сигнала, вызывающего девиацию фазы  $360^\circ$  ( $2\pi$  радиан), равна  $f_s$ .

Пусть входной сигнал определяется выражением:

$$S_i = A \sin(2\pi f_i t), \quad (3.1)$$

где  $A$  – константа.

В случае линейной фазовой модуляции этот сигнал можно записать в форме:

$$S_i = A \sin(2\pi f_i t + Kt), \quad (3.2)$$

где  $K$  – постоянная скорость изменения фазы.

Преобразуя это соотношение, получим:

$$S_i = A \sin\left(f_i + \frac{K}{2\pi}t\right), \quad (3.1)$$

где  $f_s = K/2\pi$  – изменение частоты.

Сдвиг частоты можно также рассматривать как результат однополосной модуляции с подавленными несущей и второй боковой частотной составляющей. Для этой цели, как показано на рис. 3.4, а, может быть использована ЛБВ усилительного каскада.

При изменении напряжения спирали ЛБВ, как показано на рис. 3.4, б, изменяется фаза усиливаемого радиосигнала. Если изменение фазы происходит линейно до значения, кратного  $360^\circ$ , и затем напряжение спирали быстро возвращается до его первоначального уровня, то частота выходного сигнала изменится на значение частоты пилообразных колебаний. Другим вариантом устройства, обеспечивающего перенос частоты, является дискретный управляемый фазовращатель (рис. 3.4, в). Он представляет собой набор дискретных фазовращателей, в определенной последовательности включаемых в канал прохождения сигнала, фаза которого изменяется дискретно во времени.

Дискретный фазовращатель с минимальной дискретой фазы  $11,25^\circ$  обеспечивает изменение фазы от 0 до  $360^\circ$  за 32 такта и позволяет

осуществить качественный сдвиг частоты (рис. 3.4, з). В любом случае качество работы устройства сдвига частоты зависит от линейности изменения фазы и времени обратного хода.

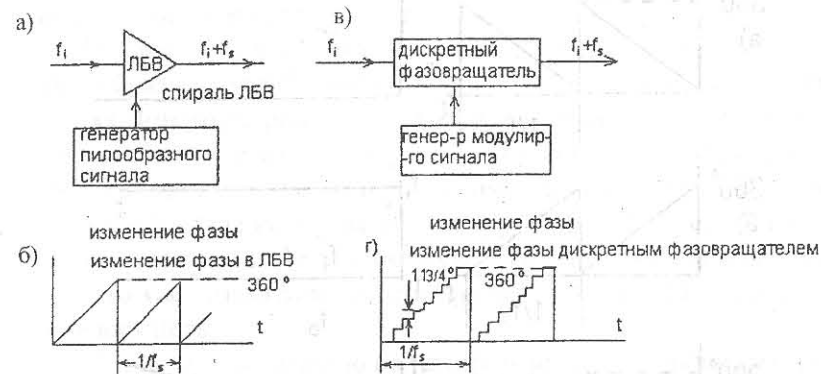


Рис. 3.4. Структурные схемы устройств сдвига частоты (а, б) и формы сигналов управления фазовым сдвигом (в, з)

Рассмотрим основные типы фазомодулированных колебаний, применяемых для сдвига частоты при создании помех.

Обозначения на рисунках имеют следующие значения:

$f_i$  – частота подавляемой РЛС;

$f_s$  – частота модулирующего сигнала (сдвиг частоты);

$f_a$  – начальная частота модулирующего сигнала (начальный сдвиг), когда она изменяется;

$f_b$  – конечная частота модулирующего сигнала (конечный сдвиг), когда она изменяется.

На рис. 3.5, а, б показаны модулирующие пилообразные сигналы постоянной частоты положительной полярности. Частота на выходе устройства будет фиксированной, при этом она равна частоте входного сигнала  $f_i$  плюс (минус) постоянный частотный сдвиг  $f_s$ . Диапазон доплеровских частот в приемном устройстве РЛС обычно охватывает частоты от нескольких килогерц до 50 кГц. Этот диапазон частот очень удобен при использовании ЛБВ для сдвига частоты и имитации ложных целей, потому что формирование пилообразного

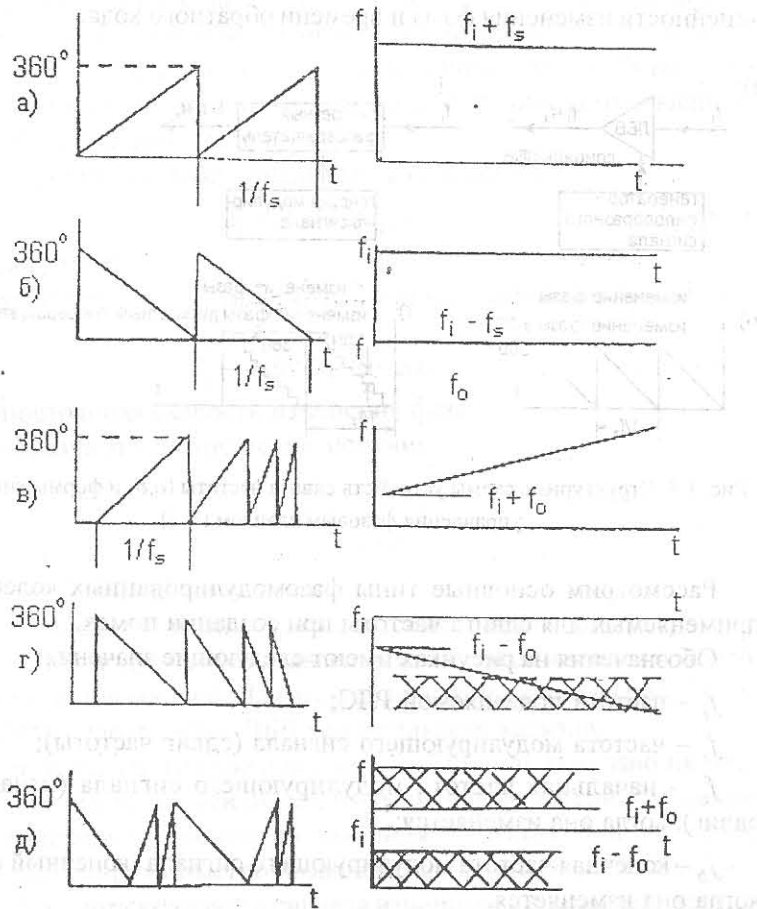


Рис. 3.5. Типы фазомодулированных сигналов, применяемых для создания помех: а – положительный пилообразный сигнал постоянной частоты; б – отрицательный пилообразный сигнал постоянной частоты; в – положительный пилообразный сигнал изменяющейся частоты; г – отрицательный пилообразный сигнал изменяющейся частоты; д – положительный и отрицательный пилообразные сигналы со случайным изменением частоты

модулирующего напряжения с постоянным периодом повторения не представляет затруднений. РЛС будет отслеживать ложную доплеровскую цель, если строб скорости РЛС захватит ее и мощность помехи достаточна, а РЛС не оборудована средствами защиты от воздействия помех по скорости.

На рис. 3.5, в, г показаны два других типа модулирующего пилообразного колебания постоянной частоты, только теперь наклон пилообразного напряжения (или направление преобразования частоты) направлен в противоположную сторону. В первом случае сдвинутая частота будет меньше частоты входного сигнала –  $(f_i - f_s)$ , во втором случае – больше на эту же величину  $(f_i + f_s)$ . Если цель, на которой установлен передатчик помех по скорости, неподвижна относительно РЛС, то эта помеха будет имитировать удаляющуюся или приближающуюся цель.

На рис. 3.5, д показано положительное пилообразное изменение фазы, частота которого увеличивается от низкой до высокой. Такой сигнал применяется для создания уводящей помехи по скорости (увода строга скорости в приемном устройстве РЛС). Если начальная частота пилообразного изменения фазы (начальный сдвиг) равна  $f_a$ , то плавное изменение частоты выходного сигнала помехи начнется на частоте  $(f_i + f_a)$ .

На рис. 3.6, а приведена структурная схема устройства преобразования частоты, при которой начальный сдвиг частоты может быть равен нулю, но скорость перемещения спектральных линий остается высокой. В этом устройстве используются два фазовых модулятора, соединенных последовательно. В первом модуляторе фазовая модуляция производится положительным пилообразным сигналом со случайным изменением частоты в интервале от  $f_a$  до  $f_b$  (рис. 3.6, б). Величины  $f_a$  и  $f_b$  могут быть выбраны достаточно высокими (от 100 до 200 кГц). Для этих частот периоды формирования пилообразного напряжения составляют 10 и 5 мкс соответственно. У второго модулятора фазовая модуляция производится пилообразным сигналом фиксированной частоты  $(f_a + f_b)/2$ , как показано на рис. 3.6, в. Отрицательное пилообразное напряжение этого сигнала осуществляет сдвиг частоты в область низких частот. Поэтому центральная частота спектра помехи по скорости теперь будет совмещена с частотой входного радиолокационного сигнала (рис. 3.6, г). В этом



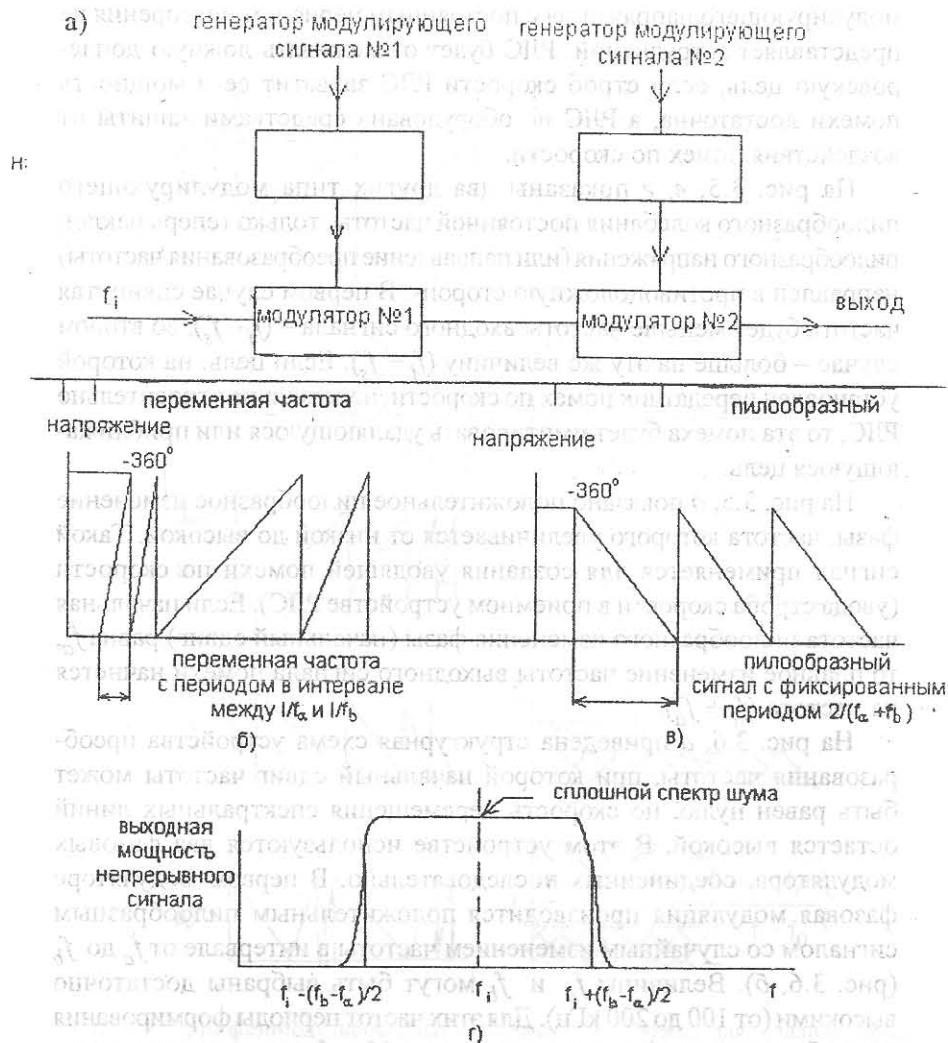


Рис. 3.6. Структурная схема устройства двукратного сдвига частоты (а); формы модулирующих сигналов № 1 (б) и № 2 (в) и спектр выходного сигнала (г)

случае отсутствует незаполненная помехой область частот в окрестностях несущей частоты входного сигнала.

Для получения высокого качества сдвига частоты к модулирующему сигналу предъявляются следующие требования: наклон пилообразного напряжения должен быть почти линейным, время обратного хода пренебрежимо малым и максимальная девиация фазы должна составлять  $2\pi$  радиан. Эти требования не всегда выполнимы из-за ограничений по габаритам, массе и стоимости аппаратуры. Важно уяснить, что произойдет при нарушении этих требований.

На рис. 3.7, а показано пилообразное изменение фазы с постоянной частотой 100 кГц с конечным временем обратного хода. Пиковое напряжение модулирующего по фазе сигнала (обычно в пределах 50-150 В) вызывает, как показано на рисунке, девиацию фазы входного сигнала на  $2\pi$  радиан. Однако это пиковое напряжение зависит от несущей частоты входного сигнала и в реальных условиях фазовый сдвиг точно на  $2\pi$  радиан будет иметь место только для одной несущей частоты в пределах широкой полосы пропускания ЛБВ. Поэтому в реальных условиях процесс сдвига частоты далек от идеального.

На рис. 3.7, б проиллюстрированы два параметра: потери при преобразовании частоты и подавление сигнала на входной частоте. Потери при преобразовании частоты характеризуют, насколько мощность выходного сигнала с преобразованной частотой меньше мощности сигнала без преобразования частоты при одном и том же уровне входного сигнала. В типовом случае эти потери составляют 1-2 дБ. Подавление сигнала при преобразовании частоты характеризуется отношением выходной мощности сигнала с преобразованной частотой к выходной мощности сигнала, частота которой равна частоте входного сигнала, равным обычно от 15 до 40 дБ в зависимости от сложности конструкции и соответственно стоимости устройства. Этот параметр исключительно важен, потому что в случае, если усиление лампы превышает подавление сигнала входной частоты, то этот сигнал усилится до такой степени, что станция помех начнет играть роль маяка.

Как показано на рис. 3.7, в модуляция приводит к образованию многочисленных спектральных составляющих, кратных 100 кГц.

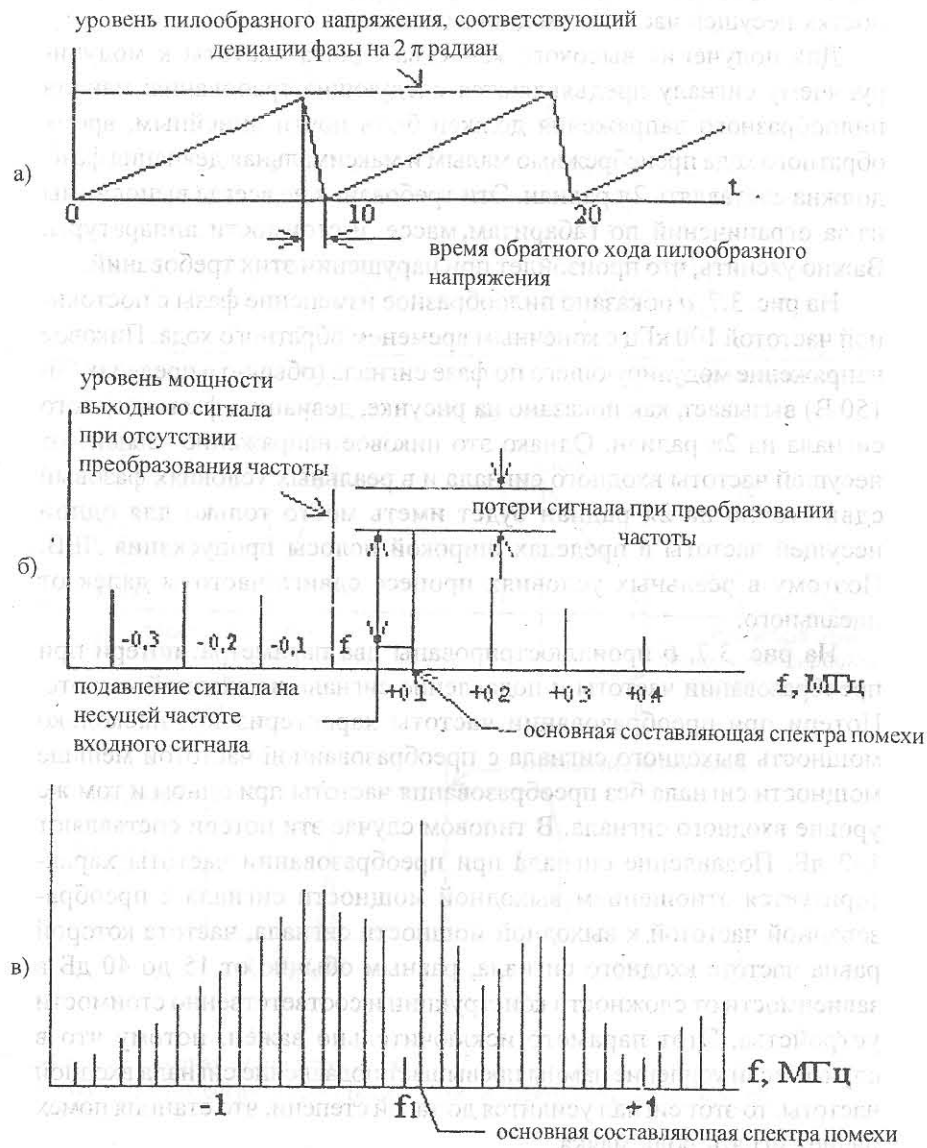


Рис. 3.7. Форма модулирующего напряжения, подаваемого на спирали ЛБВ (а) и спектры выходного сигнала помехи (б, в)

Некоторые из этих спектральных составляющих будут превышать уровень остатка мощности сигнала входной частоты. Таким образом, спектр на выходе ЛБВ очень сложен, что должно учитываться при разработке станции помех и при проектировании средств и методов помехозащиты РЛС. В частности, при разработках РЛС, у которых предусматривается защита от воздействия помех по скорости, должна учитываться возможность помехового воздействия всех составляющих выходного спектра станции помех.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Сов. радио, 1987.
2. *Дулин В.Н.* Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Энергия, 1972.
3. *Кацман Ю.А.* Приборы СВЧ. Теория, основы расчета и проектирования электронных приборов. – М.: Высшая школа, 1983.
4. *Кацнельсон Б.В., Калугин А.М., Ларионов А.С.* Электровакуумные и газоразрядные приборы: Справочник. – М.: Радио и связь, 1985.
5. Проектирование радиопередатчиков / *В.В. Шахгильдян, М.С. Шумилин, В.Б. Козырев* и др. – М.: Радио и связь, 2000.
6. Радиотехнические системы в ракетной технике / *В.Д. Великанов, В.И. Галкин, И.И. Захарченко* и др. – М.: Воениздат, 1974.
7. *Цветнов В.В., Демин В.П., Куприянов А.И.* Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиопротиводействие. – М.: Изд-во МАИ, 1998.

Учебное издание

### **ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ЛАМПАМИ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ** Методические указания

Составитель: *Леонович Георгий Иванович*

Редактор *Н. С. Куприянова*

Компьютерная верстка *Т. Е. Половнева*

Подписано в печать 5.03.2003 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,3. Усл. кр.-отт. 2,5. Уч.-издл. 2,5.

Тираж 50 экз. Заказ /9/. Арт. С - 44/2003.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет им. академика С. П. Королева.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

РИО Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.