



А.Т. Рыбалов

ЛАМПЫ С БЕГУЩЕЙ и ОБРАТНОЙ ВОЛНОЙ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1959

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ТЕХНИКА

А. Г. РЫБАЛОВ

ЛАМПЫ С БЕГУЩЕЙ
И ОБРАТНОЙ
ВОЛНОЙ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1959

А. Г. Рыбалов. ЛАМПЫ С БЕГУЩЕЙ И ОБРАТНОЙ ВОЛНОЙ

Брошюра «Лампы с бегущей и обратной волной» входит в выпускаемую Военным издательством библиотеку «Радиолокационная техника». Библиотека рассчитана на офицеров, связанных с эксплуатацией радиотехнических средств. Она может быть также использована широким кругом читателей, желающих подробно ознакомиться с работой отдельных узлов и элементов радиолокационных станций.

Перечень брошюр, входящих в библиотеку «Радиолокационная техника», помещен на 3-й странице обложки.

В брошюре «Лампы с бегущей и обратной волной» в популярной форме излагаются принцип действия, конструктивные и эксплуатационные особенности ламп с бегущей и обратной волной;

ВВЕДЕНИЕ

В условиях быстрого развития средств противодействия радиолокации возникает необходимость создания такой радиолокационной аппаратуры, которая обладала бы большой дальностью действия в широком диапазоне рабочих частот.

Частично эта задача решается применением в радиолокационной аппаратуре ламп с бегущей и обратной волной (сокращенно ЛБВ и ЛОВ), обладающих рядом преимуществ перед другими электровакуумными приборами сверхвысоких частот.

Наиболее существенные преимущества рассматриваемых ламп — сравнительно малый уровень собственных шумов, широкий диапазон равномерно усиливаемых частот и возможность использования ламп при усилении и генерировании электромагнитных колебаний сверхвысоких частот вплоть до миллиметрового диапазона волн. Так, современный клистрон, работающий на тех же частотах, что и ЛБВ, имеет коэффициент шума примерно 25 дБ, а лампа с бегущей волной — всего 6—12 дБ; клистроны и магнетроны могут работать без механической перестройки в сравнительно небольшой полосе частот, составляющей доли процента рабочей частоты, тогда как ЛБВ и ЛОВ работают в очень широкой полосе частот — до нескольких десятков процентов. При использовании ЛБВ и ЛОВ в усилителях высокой частоты радиолокационных приемников дециметрового и сантиметрового диапазонов волн возрастает предельная чувствительность, а следовательно, и дальность действия радиолокационных станций. Применение усилителей высокой частоты на ЛБВ, обладающих большой полосой электронной перестройки, расширяет диапазон частот радиолокационных приемников.

Лампы с обратной волной в большинстве своем служат для генерирования электромагнитных колебаний **малой и**

большой мощности в очень широком диапазоне сверхвысоких частот — в несколько десятков миллионов герц. Уже разработаны и находят применение усилители малых сигналов на ЛБВ и генераторы на ЛОВ, позволяющие соответственно усиливать и генерировать электромагнитные колебания в диапазоне сантиметровых волн.

В настоящей брошюре делается попытка изложить физические основы работы ламп с бегущей и обратной волной, не прибегая к сложному математическому аппарату, а ограничиваясь преимущественно анализом качественной стороны явлений. Поэтому брошюра не может претендовать на строгое рассмотрение процессов, а предполагает некоторые упрощения.

ЛАМПА С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ

1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛБВ

Устройство спиральной ЛБВ

Типовая спиральная лампа с бегущей волной (рис. 1) состоит из двух основных элементов: электронного прожектора и замедляющей системы.

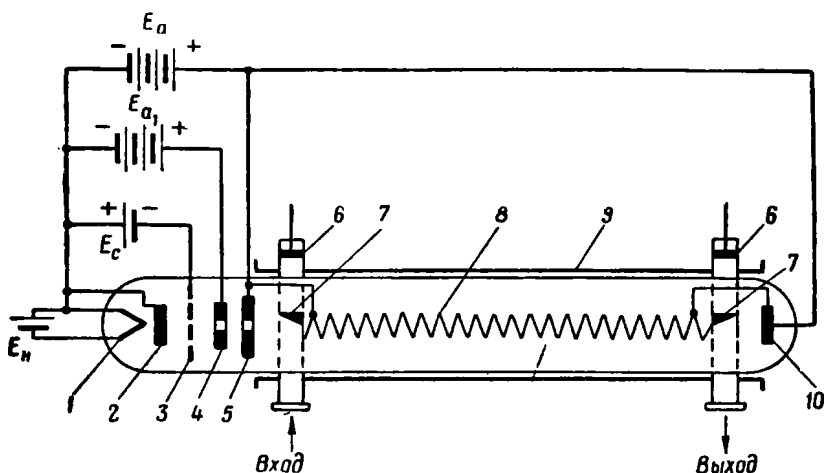


Рис. 1. Устройство лампы с бегущей волной:

1 — нить накаливания; 2 — катод; 3 — управляющий электрод; 4 — первый анод; 5 — второй анод; 6 — согласующие устройства; 7 — штыревые антенны; 8 — спираль; 9 — внешний провод спиральной линии; 10 — коллектор

Первый элемент — электронный прожектор — служит для создания узкого пучка электронов, пролетающего через спираль вдоль ее оси. При выходе из спирали электроны улавливаются положительно заряженным электродом — коллектором 10.

Для фокусировки электронного потока в электронном прожекторе вблизи катода 2 помещены управляющий электрод 3 и два анода 4 и 5 в виде диафрагм с небольшими отверстиями по оси спирали. На управляющий электрод обычно подается небольшое положительное или отрицательное напряжение в несколько вольт, а на первый анод — положительное напряжение в несколько десятков вольт. Подбором этих напряжений добиваются необходимой величины электронного потока и фокусировки электронного пучка, входящего в спираль.

Ко второму аноду подводится положительное напряжение в несколько сот вольт. Изменением этого напряжения обеспечивают нужную скорость v_0 полета электронов через спираль, вследствие чего напряжение второго анода U_0 принято называть ускоряющим или управляющим напряжением.

Второй элемент — замедляющая система — представляет собой отрезок двухпроводной коаксиальной линии, внутренний провод которой свернут в спираль 8 и укреплен внутри горловины стеклянной колбы лампы, а внешний провод 9 образуется полый металлической трубой, в которую вставляется горловина ЛБВ. Замедляющая система служит для уменьшения скорости распространения (движения) электромагнитной волны вдоль оси спирали.

На входе и выходе спирали имеются небольшие штыревые антенны 7, с помощью которых к спиральной линии подводится и после усиления отбирается электромагнитная энергия. При этом высокочастотная мощность, подлежащая усилению в ЛБВ, подводится к тому концу линии, который расположен у электронного прожектора, а отводится после усиления от конца линии, расположенного у коллектора.

Принцип действия ЛБВ

Принцип действия ЛБВ заключается в том, что при воздействии высокочастотных электромагнитных колебаний на входную антенну вдоль спирали начинает распространяться замедленная электромагнитная волна. Электронный поток, перемещаясь вдоль оси спирали, вступает во взаимодействие с этой волной. В результате кинетическая энергия электронов начинает превращаться в электромагнитную энергию бегущей волны. По мере продвижения волны вдоль спирали эта энергия непрерывно увеличивается. А так как

волна движется замедленно (примерно с той же скоростью, что и электронный поток), то она успевает получить значительную энергию.

2. УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ

В предыдущем разделе было показано, что усиление электрических колебаний в ЛБВ происходит в результате взаимодействия движущегося потока электронов и электромагнитной волны. Следовательно, чтобы понять принцип работы ЛБВ, необходимо знать физическую сущность процессов такого взаимодействия.

Взаимодействие потока электронов с постоянным электрическим полем

Пусть из нагретого катода K электронного прожектора вылетают электроны, обладающие некоторым начальным запасом кинетической энергии W_0 (рис. 2). Каждый из

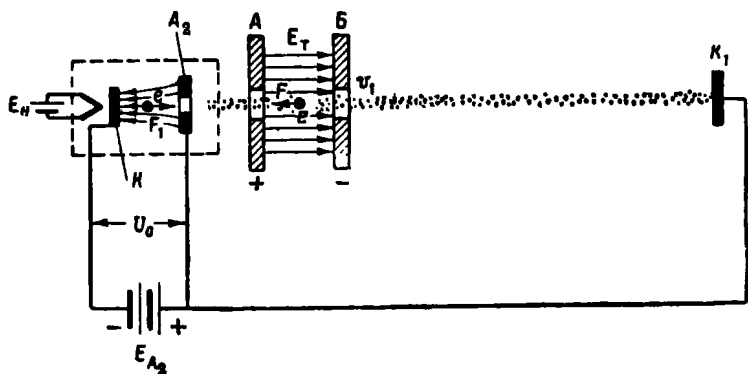


Рис. 2. Взаимодействие электронного потока с постоянным электрическим полем конденсатора AB :

K_1 — коллектор; A_2 — второй анод; K — катод

этих электронов, оказавшись над поверхностью катода, притягивается вторым анодом A_2 . Следовательно, любой такой электрон, попав в постоянное электрическое поле второго анода, начнет двигаться ускоренно. При этом чем больше скорость электрона, тем выше его кинетическая энергия.

Откуда же берется эта энергия, где тот первоисточник, который пополняет энергию электронного пучка при его движении через прожектор?

Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что электроны ускоряются под действием электрического поля, созданного между анодом и катодом напряжением U_0 батареи E_{A2} . Электрическое поле, ускоряя электроны, совершает работу, т. е. затрачивает свою энергию, которая тотчас восполняется источником постоянного тока E_{A2} . Таким образом, электронный пучок, исходящий из электронного прожектора, непрерывно уносит электрическую энергию источника постоянного тока E_{A2} , питающего электронный прожектор. При определенных условиях эту энергию можно сообщить электромагнитному полю и тем самым усилить его. Чтобы убедиться в этом, посмотрим, что происходит при движении потока электронов между пластинами A и B заряженного воздушного конденсатора. Лучше всего это сделать, наблюдая за полетом одиночного электрона e .

Пусть один из электронов пучка, двигаясь со скоростью v_1 , вошел через отверстие в пластине A в электрическое поле конденсатора. Взаимодействуя с этим полем, электрон будет тормозиться. Действительно, имея отрицательный заряд, электрон e притягивается положительно заряженной пластиной A и отталкивается отрицательно заряженной пластиной B . Следовательно, на электрон действует сила F , направленная в сторону, обратную его движению. Под действием этой силы скорость движения электрона уменьшается, и он отдает часть своей кинетической энергии тормозящему электрическому полю E_T . Чем больше электронов пролетит между пластинами A и B , тем большая энергия будет сообщена электрическому полю конденсатора. Таким образом, пока через пространство AB проходит электронный поток, наблюдается процесс усиления электрического поля конденсатора за счет энергии источника постоянного тока, питающего электронный прожектор.

Из рассмотрения взаимодействия потока электронов с постоянным электрическим полем можно сделать следующие выводы:

— если силовые линии электрического поля направлены против движения электрона, то он этим полем ускоряется, отбирая энергию у электрического поля;

— если силовые линии поля совпадают с направлением

движения электрона, то он тормозится этим полем, причем поле отбирает энергию у электрона;

— поток электронов, взаимодействуя с постоянным электрическим полем, может усилить это поле за счет энергии источника постоянного тока.

Взаимодействие потока электронов с переменным электрическим полем

Приложим к пластинам *A* и *B* переменное синусоидальное напряжение $u_{\sim}$ (рис. 3). Вследствие этого между пластинами образуется переменное электрическое поле

$$E_{\sim} = E_{\text{макс}} \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

где $E_{\text{макс}}$ — наибольшая напряженность электрического поля между пластинами, называемая обычно амплитудой переменного электрического поля;
 T — период электрических колебаний;
 π — постоянная величина ($\pi \approx 3,14$).

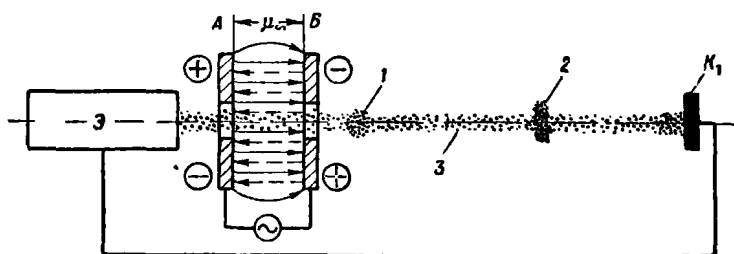


Рис. 3. Взаимодействие электронного потока с переменным электрическим полем:

Э — электронный прожектор; K_1 — коллектор; 1 — формирующийся электронный сгусток; 2 — сформировавшийся электронный сгусток; 3 — участок разрежения

Покажем характер изменения напряженности электрического поля $E_{\sim}$ графически (рис. 4). По вертикальной оси отложим величину напряженности электрического поля, а по горизонтальной оси — время.

Из рис. 4 видно, что электрическое поле конденсатора изменяется во времени как по величине, так и по направлению. В первый полупериод оно тормозящее, во второй — ускоряющее и т. д.

Если теперь между пластинами конденсатора пропустить равномерный поток электронов, то во время первого полу- периода он будет тормозиться электрическим полем, а во время второго полупериода — ускоряться им. Вследствие этого поток электронов будет то отдавать часть своей энергии электрическому полю, то отбирать ее. В результате за время одного или нескольких полных периодов электриче- ских колебаний энергия, со- общаемая электронным пото- ком электромагнитному по- лю, окажется равной нулю. Другими словами, непре- рывный электронный поток, проходя через переменное электрическое поле, хотя и взаимодействует с ним, но не отдает ему своей энергии.

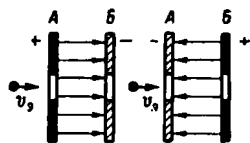
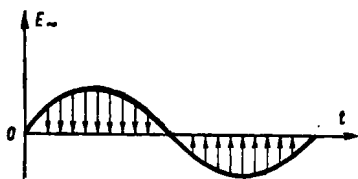


Рис. 4. Электрическое поле между пластинами A и B

В рассмотренном при- мере нет переноса электриче- ской энергии от источников, питающих электронный про- жектор, в переменное элек- трическое поле конденса- ра. Тем не менее действие переменного электрического поля на электронный поток не пропадает бесследно. В резуль- тате взаимодействия электронного потока и переменного электрического поля между пластиной B и коллектором K_1 происходит группирование электронов (см. рис. 3), т. е. об- разуются неравномерный электронный поток, характеризую- щийся сгущениями и разрежениями электронов. Сгущения электронов принято называть электронными сгустками. Чтобы понять процесс образования электронных сгустков, рассмотрим характер изменения скорости электронов в элек- трическом поле конденсатора (рис. 5).

Предположим, что все электроны попадают в прост- ранство AB с начальной скоростью v_1 . Так как электрическое поле между пластинами конденсатора переменное, то оно действует на электроны, попадающие в него в разные мо- менты времени, с различной силой F . Действительно, те электроны, которые пролетят пространство AB в течение промежутка времени, прилегающего к моментам вре- мени t_1 и t_3 (рис. 5, a), замедляются с некоторой силой F_1 (рис. 5, b). Те же электроны, которые совершат пролет несколько позднее, в момент времени t_2 , будут тормозиться

с силой $F_2 > F_1$, так как напряженность электрического поля к этому времени станет большей. Через некоторое время тормозящее поле сменится ускоряющим и все электроны, которые пролетят конденсатор в моменты времени t_5 , t_6 , t_7 и т. д., получат различное ускорение, т. е. будут обладать разными скоростями, или, как часто принято говорить, окажутся модулированными по скорости.

Для практики наибольший интерес представляют те электроны, которые проходят между пластинами A и B в мо-

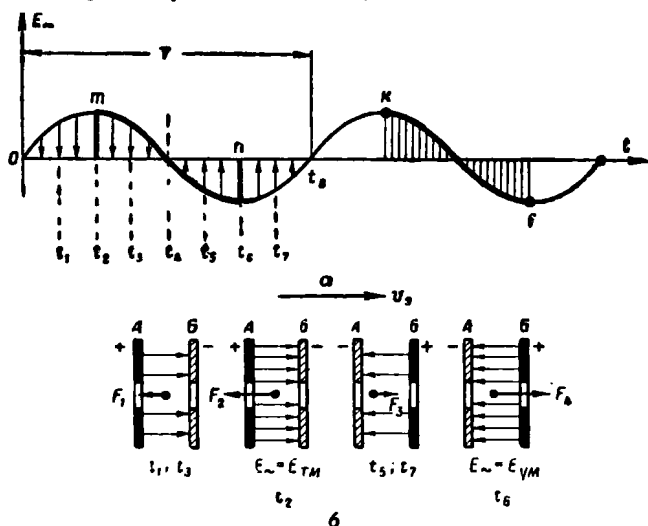


Рис. 5. Изменение скорости электронов в электрическом поле конденсатора:

α — временные области группирования электронов; β — электрическое поле конденсатора в различные моменты времени

менты времени, прилегающие к t_4 , т. е. тогда, когда тормозящее поле сменяется ускоряющим (временная область mn на рис. 5, a).

Электроны, вылетающие из пространства AB в моменты времени t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 , будут обладать различными скоростями. В пространство пластина B — коллектор сначала попадут электроны, прошедшие через конденсатор в момент времени t_2 , затем t_3 и т. д. Для простоты дальнейших рассуждений будем называть эти электроны соответственно 2, 3, 4, 5, 6.

Легко видеть, что электроны 2, хотя и вылетели из пластины B первыми, обладают наименьшей скоростью v_2

(рис. 6), так как пролетели конденсатор тогда, когда в нем было наибольшее тормозящее поле. Электроны 3 вышли несколько позднее, испытали меньшее торможение и поэтому движутся со скоростью $v_3 > v_2$. Электроны 4 прошли между пластинами *A* и *B*, не изменив своей скорости ($v_4 = v_1$), поскольку поле конденсатора в момент их пролета было равно нулю. Электроны 5, пролетев через конденсатор, приобрели скорость $v_5 > v_4$, потому что поле к моменту их пролета

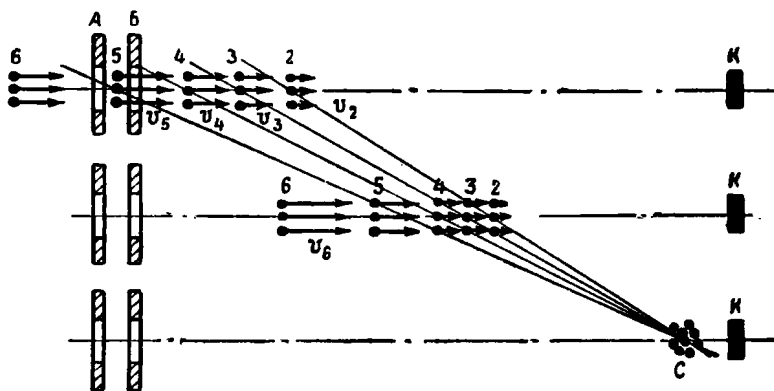


Рис. 6. Процесс образования электронного сгустка

стало ускоряющим, и т. д. Таким образом, во временной области *mn* электрон движется с тем большей скоростью, чем позднее он вылетает из пластины *B*. Свободно перемещаясь между пластиной *B* и коллектором и постепенно догоняя один другого, эти электроны в некоторый момент времени образуют электронный сгусток. По мере продвижения к коллектору сгусток размывается, так как, с одной стороны, электроны, обладая отрицательным зарядом, взаимно отталкиваются и, с другой стороны, имея различные скорости, электроны постепенно расходятся после того, как в какой-то момент времени они сфокусировались.

Так обстоит дело с электронами временной области *mn*. Электроны временной области *nk* (рис. 5, *a*) электронного сгустка не образуют, потому что при выходе из пространства *AB* они получают такое распределение скоростей, которое не собирает их, а рассеивает. Следующий сгусток образуют электроны области *kf* и т. д. Таким образом, в пространстве пластина *B* — коллектор образуются электронные

сгустки, следующие один за другим с временным интервалом T , равным периоду электрических колебаний между пластинами конденсатора.

Итак:

— при взаимодействии переменного электрического поля с равномерным потоком электронов это поле не усиливается;

— под действием переменного электрического поля равномерный поток электронов собирается в электронные сгустки, следующие один за другим с временным интервалом, равным периоду колебаний поля.

Взаимодействие потока электронных сгустков с переменным электрическим полем

Во всех предыдущих примерах через конденсатор проходил равномерный поток электронов. Предположим теперь,

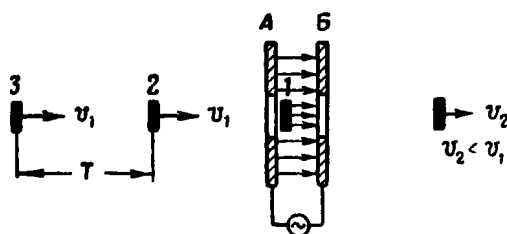


Рис. 7. Взаимодействие потока электронных сгустков с переменным электрическим полем

что через пространство AB пролетают электронные сгустки с временным интервалом, равным периоду колебаний переменного электрического поля конденсатора (рис. 7).

Пусть первый электронный сгусток попал в пространство AB тогда, когда между пластинами было наибольшее тормозящее поле (момент времени t_{m1} , рис. 8). Проходя в этом поле, сгусток отдаст ему часть своей кинетической энергии. Так как следующий сгусток запаздывает по сравнению с первым на целый период, то он попадет в пространство AB тогда, когда между пластинами будет вновь наибольшее

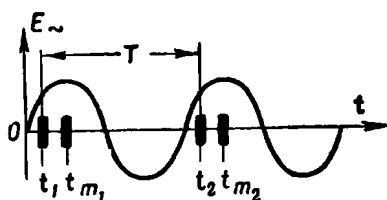


Рис. 8. Временное положение электронного сгустка при пролете в тормозящем поле

тормозящее поле (в момент времени t_{m2}). Этот сгусток также отдаст часть энергии переменному полю и т. д.

Таким образом, поток электронных сгустков, находящийся в определенной временной связи с переменным электрическим полем, способен отдавать ему часть своей кинетической энергии.

Если бы электронные сгустки проходили тормозящее поле не в моменты времени t_{m1} , t_{m2} и т. д., а в моменты времени t_1 , t_2 и т. д., то энергия, отдаваемая электрическому полю, была бы меньше.

Возбуждение электромагнитных колебаний при помощи электронного потока

Покажем, что, используя поток электронов, можно энергию источника постоянного тока преобразовать в энергию электромагнитных колебаний. С этой целью соберем схему, состоящую из электронного прожектора и двух пар пластин с колебательным контуром, включенным между ними (рис. 9). Через каждую пару пластин проходит электронный поток, который улавливается коллектором K_1 .

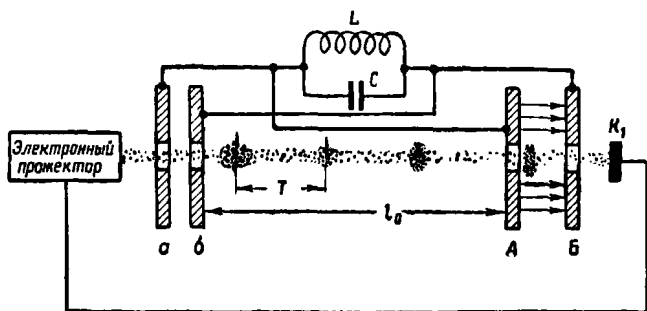


Рис. 9. Возбуждение высокочастотных электромагнитных колебаний при помощи электронного потока

Пусть в контуре LC за счет теплового движения электронов (за счет флуктуаций тока) возникли слабые электрические колебания с частотой f_0 . Переменное напряжение этих колебаний U_k создает между пластинами a и b и пластинами A и B переменное электрическое поле с частотой f_0 . Электронный поток, проходя через первую пару пластин, модулируется по скорости и при дальнейшем движении в пространстве $бА$ образует электронные сгустки с временным

интервалом, равным периоду электрических колебаний $T = \frac{1}{f_0}$, возникших в контуре. Расстояние между парами пластин l_0 и начальную скорость электронов подберем так, чтобы электронные сгустки пролетали между пластинами A и B тогда, когда между ними будет наибольшее тормозящее поле.

Пролетая между пластинами A и B , электронные сгустки будут отдавать свою кинетическую энергию электрическому полю, поддерживая первоначально возникшие колебания в контуре. Если энергия, отдаваемая сгустками контуру, окажется больше энергии потерь в нем, то первоначальные колебания будут нарастать и превратятся в незатухающие.

Заметим, что переменное электрическое поле между пластинами a и b энергии не расходует, так как через них проходит равномерный поток электронов. Под действием этого поля происходит лишь модуляция электронов по скорости и их последующее группирование. Следовательно, на участке aA электроны группируются, а на участке AB энергия источника постоянного тока превращается в энергию электромагнитных колебаний.

Рассмотренный процесс взаимодействия электронного потока с переменным электрическим полем используется в так называемом двухконтурном клистроне, который применяется для генерации колебаний сверхвысокой частоты. В несколько измененном виде описанный процесс применяется в одноконтурном, или отражательном, клистроне, широко распространенном в современной радиолокационной аппаратуре.

Точно так же процесс усиления высокочастотных электромагнитных колебаний протекает и в лампе с бегущей волной, где движущиеся электронные сгустки отдают часть своей энергии бегущей электромагнитной волне. Однако если в клистроне поток электронов взаимодействует с электрическим полем, изменяющимся только во времени, то в ЛБВ он взаимодействует с высокочастотным электрическим полем, которое изменяется как во времени, так и в пространстве.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЛБВ

Усиление электрических колебаний в лампе с бегущей волной принципиально не отличается от их усиления в клистроне. Оно основано на том, что электрическая энергия источника постоянного тока передается высокочастотному

полю при помощи электронных сгустков во время их прохождения в тормозящем поле усиливаемых колебаний.

В лампе с бегущей волной электронные сгустки возникают и совершают движение в высокочастотном электрическом поле спирали, которое в свою очередь возникает в результате движения по спирали усиливаемой электромагнитной волны. Следовательно, чтобы понять процесс взаимодействия усиливаемой волны с электронным потоком, нужно отчетливо представлять себе характер распределения высокочастотного электрического поля внутри спирали, а для этого надо прежде всего хорошо знать физические процессы в линиях передачи.

Некоторые сведения из теории линий передачи

Для передачи высокочастотной электромагнитной энергии от генератора к нагрузке часто применяются отрезки двухпроводных коаксиальных линий, т. е. высокочастотные кабели, у которых один проводник расположен внутри другого (рис. 10).

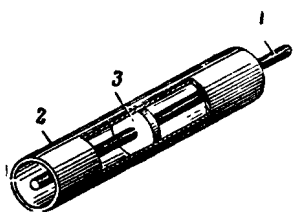


Рис. 10. Отрезок коаксиальной линии:

1 — внутренний провод; 2 — внешний провод; 3 — изолятор

В отличие от обычного колебательного контура, индуктивность и емкость которого сосредоточены в катушке и конденсаторе, двухпроводная линия представляет собой цепь с равномерно распределенными по ее длине параметрами. Действительно, каждый, хотя бы и очень короткий, отрезок линии длиной Δl

обладает некоторой индуктивностью ΔL и сопротивлением Δr , а между отрезками проводников имеется емкость ΔC (рис. 11).

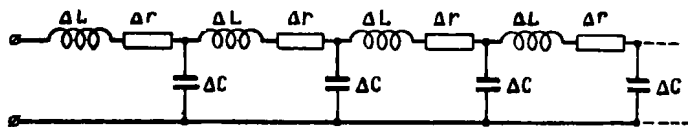


Рис. 11. Эквивалентная схема отрезка коаксиальной линии

Свойства двухпроводной линии определяются величинами индуктивности L_0 , емкости C_0 и сопротивления r_0 , приходящимися на единицу ее длины. В отрезках двухпроводных линий, применяемых в радиотехнике, потери обычно