

ВЛИЯНИЕ РАЗНОСТИ СКОРОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗДЕЛЕННЫХ ПОТОКОВ В ДВУЛУЧЕВОЙ ЛБВ

В. Е. Коновалов, В. Г. Шульга

Харьков

В приближениях линейной теории рассматривается взаимодействие высокочастотного поля замедляющей системы с двумя разнородными пространственно разнесенными электронными потоками.

Волновые свойства двулучевой ЛБВ определяются следующим характеристическим уравнением:

$$(j\delta + jd - b)[(\delta^2 + h^2)^2 + 2B(\delta^2 - h^2) + B^2(1 - \rho^2)] - 2(\delta^2 - h^2) - 2B(1 - \rho) = 0, \quad (1)$$

где h — параметр разности скоростей;
 B — параметр пространственного заряда;
 ρ — параметр связи электронных потоков;
 b — параметр разности скоростей «холодной» волны системы со средней скоростью электронов;
 d — параметр «холодного» затухания;

$\delta = x + jy$ — корень характеристического уравнения.

Уравнение (1) является уравнением пятой степени относительно δ , и его корни вычисляются на ЭЦВМ при фиксированных значениях параметров.

На рис. 1—6 приведены зависимости корней характеристического уравнения двулучевой ЛБВ $\delta_k = x_k + jy_k$ от параметра скорости b для нескольких значений параметра разности скоростей $h = 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ при неизменных параметрах ρ , B и d .

Как видно из рис. 1—6, в линии замедления распространяется пять волн, обозначенных y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 . Волны с меняющейся амплитудой (нарастающие и убывающие) показаны x с соответствующим индексом. Для облегчения анализа решения характеристического уравнения может быть использована схема расположения скоростей электронных потоков и скоростей волн пространственного заряда каждого из потоков относительно невозмущенной волны в линии (рис. 8).

При больших $|b|$, когда скорости обоих потоков далеки от скорости невозмущенной волны линии замедления, нет взаимодействия электронных потоков с полем бегущей волны, а существуют свободные волны пространственного заряда и волна линии. Фазовые постоянные свободных волн пространственного заряда близки к значениям фазовых постоянных распространения в электронно-волновой лампе. Они определяются следующим соотношением: $y_{1-4} = \pm B^{\frac{1}{2}} \pm h$.

$B=1; d=0; P=0,75; h=0,1$

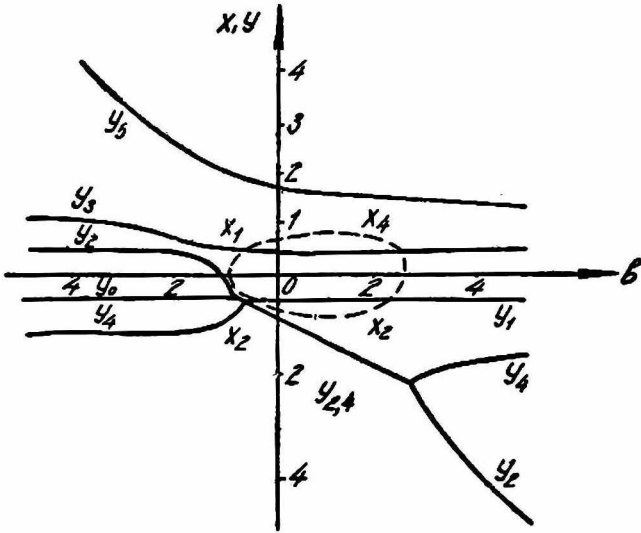


Рис. 1.

$B=1; d=0; P=0; h=0,5$

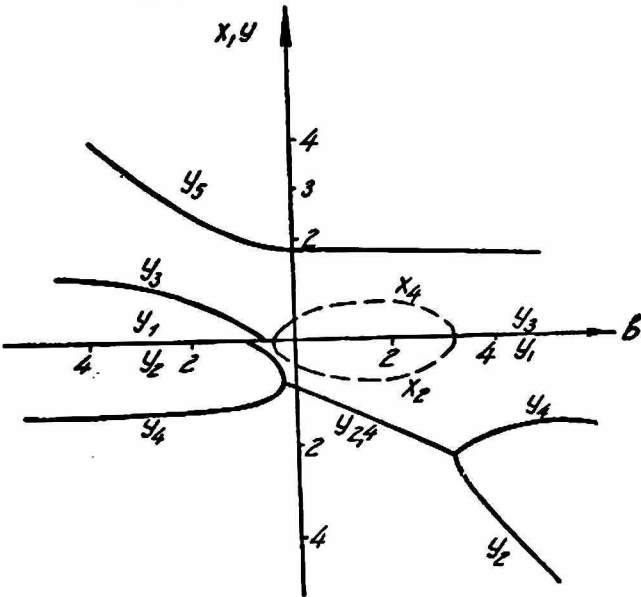


Рис. 2.

$$B=1; d=0; P=0,75; h=1$$

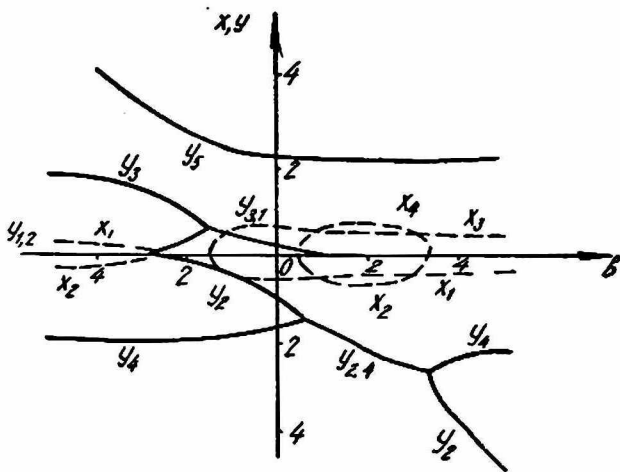


Рис. 3.

$$B=1; d=0; P=0,75; h=1,5$$

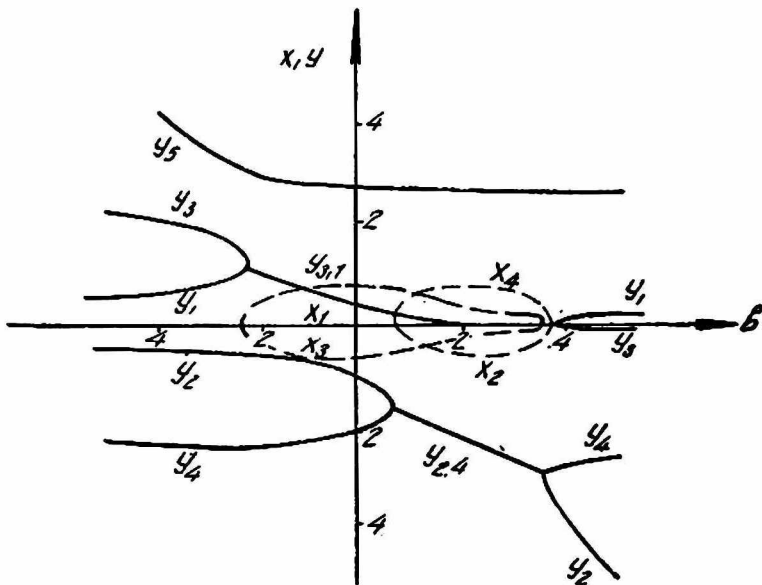


Рис. 4.

$$B=1; d=0; p=0,75; h=2$$

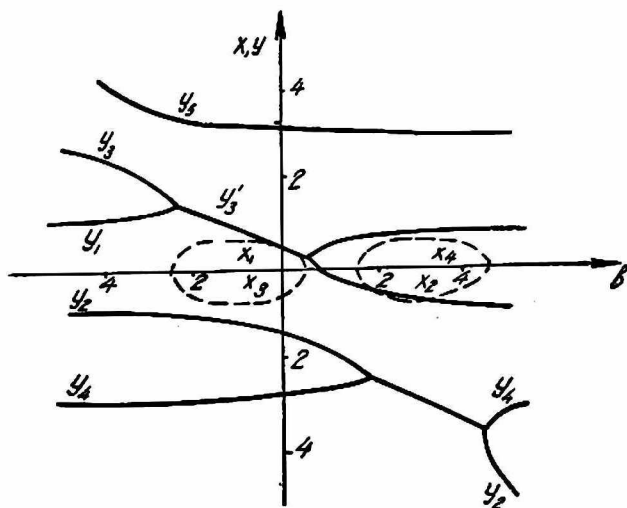


Рис. 5.

$$B=1; d=0; p=0,75; h=25$$

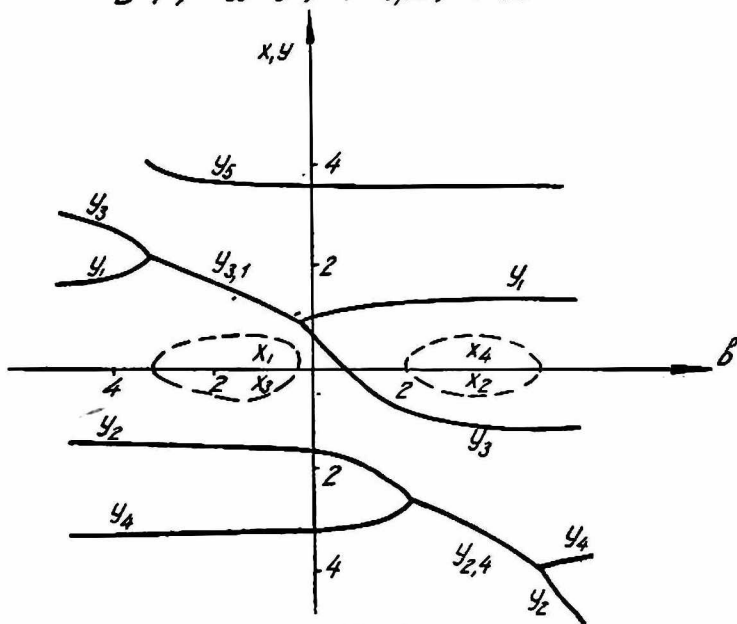


Рис. 6.

При определенных условиях наблюдается электронно-волновое взаимодействие медленной волны пространственного заряда быстрого потока с быстрой волной пространственного заряда медленного потока, которое приводит к образованию пары волн (нарастающей и убывающей) с равными фазовыми постоянными.

При уменьшении $|b|$, когда скорость невозмущенной волны приближается к скорости одного из потоков, происходит взаимодействие медленной волны пространственного заряда соответствующего потока с волной линии замедления.

При этом образуется также пара волн с меняющейся амплитудой (нарастающая и убывающая); фазовые постоянные обеих волн одинаковы.

Из рис. 1—6 видно, что имеются две области нарастающих решений (амплитудные постоянные отличны от нуля), обусловленные взаимодействием медленных волн пространственного заряда обоих потоков с волной линии. Зависимость b_{\max} (значение параметра рассинхронизма, соответствующее максимальному значению амплитудной постоянной распространения) от параметра разности скоростей потоков приведена на рис. 8. Разность между b_{\max} , соответствующими взаимодействию волн пространственного заряда медленного и быстрого потоков с линией замедления, приблизительно равна $2h$.

Следует отметить, что параметр разности скоростей h не оказывает существенного влияния на ширину области нарастающих решений и максимальное значение амплитудной постоянной распространения нарастающей и убывающей волн до тех пор, пока не возникает электронно-волновое взаимодействие.

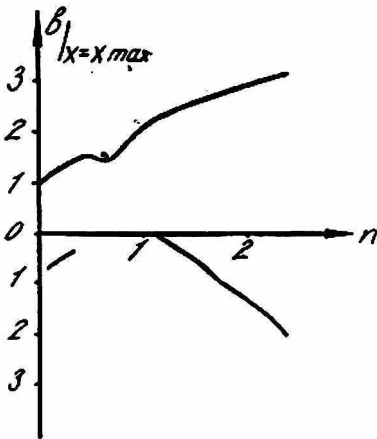


Рис. 8.

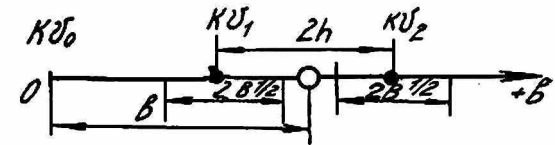


Рис. 7.

Характерно, что фазовые постоянные пары волн с меняющейся амплитудой, обусловленные взаимодействием медленной волны пространственного заряда медленного потока с волной линии, отрицательны, как и в случае однолучевой ЛБВ, а для взаимодействия быстрого потока с линией — положительны. Однако это не означает, что в последнем случае взаимодействие имеет место при скорости потока, меньшей скорости замедленной волны. Этот результат объясняется тем, что фазовые постоянные выражаются относительно средней скорости обоих потоков, а не скорости каждого потока. По схеме расположения потоков относительно невозмущенной волны линии замедления (см. рис. 7) легко убедиться в том, что указанные взаимодействия осуществляется

при условии, когда скорость быстрого потока больше скорости замедленной волны. Зависимость u_{\max} от параметра разности скоростей h подобна приведенной на рис. 8 для b_{\max} с той лишь разницей, что ветви медленного и быстрого потоков изменяют знак на обратный.

При больших $|b|$ кроме волны пространственного заряда обоих потоков хорошо видна волна линии замедления постоянной амплитуды (u_b при $b < 0$).

Согласно линейной теории электронно-волновой лампы*, нарастающая волна возникает в результате взаимодействия двух разноскоростных электронных потоков при определенных соотношениях между их скоростями и плотностями токов. При одинаковых плотностях тока в каждом потоке нарастающая волна существует в интервале значений параметра неоднородности $0 < \kappa < 2^{\frac{1}{2}}$, который определяется так:

$$\kappa = \frac{h}{B^{\frac{1}{2}}}$$

($\kappa_{\max} \approx \frac{\sqrt{3}}{2}$ — значение параметра, соответствующее максимуму амплитудной постоянной нарастающей волны).

Параметр неоднородности для показанной на рис. 1—6 последовательности параметра h принимает следующие значения: 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5.

Как видно из этих рисунков, электронно-волновое взаимодействие имеет место при значениях параметра неоднородности от $0,5 < \kappa < 0,7$ до $1,5 < \kappa < 2,0$. В электронно-волновом взаимодействии участвуют две ближайшие по скорости волны пространственного заряда электронных потоков — медленная волна пространственного заряда быстрого потока и быстрая волна пространственного заряда медленного потока.

Электронно-волновое взаимодействие двух потоков в присутствии замедляющей системы имеет свои специфические особенности. Когда скорости электронных потоков значительно отличаются от скорости волны линии ($|b|$ велико), в системе распространяются волны, фазовые и амплитудные, постоянные распространения которых близки к постоянным электронно-волновой лампы (см. $h = 1$). При приближении скорости волны к скоростям электронных потоков волны пространственного заряда потоков возмущаются. Эти возмущения проявляются в изменении фазовых постоянных (изменение скорости волн пространственного заряда), обусловленные обменом реактивной мощностью между волной системы и волнами потоков.

Скорости медленных волн пространственного заряда увеличиваются (y_1 и y_4 растут), скорости быстрых волн пространственного заряда уменьшаются (y_3 и y_2 уменьшаются) и переходят в волну системы. Волна системы, в свою очередь, переходит в соответствующую волну пространственного заряда. В результате возмущающего действия волны линии изменение скоростей взаимодействующих волн оказывается существенным, и электронно-волновое взаимодействие исчезает (см. при $h = 1,0; 1,5$). Возникает область, определяемая интервалом значений параметра рассинхронизма, в пределах которой существуют волны постоянной амплитуды (амплитудные постоянные равны нулю).

Ширина этой области при фиксированном значении B , p и d зависит от разности скоростей потоков h . Так, при $h = 0,7$ и $h = 1,0$ ширина указанной области по b равна соответственно 0,4 и 1,2. С дальнейшим ростом h электронно-волновое взаимодействие в области отрицательных значений b (по крайней мере до $b = -8$) не наблюдается в связи с возмущениями волной линии. В то же время при приближении к условию «синхронизма» фазовой скорости линии и скорости быстрого потока возникает взаимодействие, подобное тому, что имеет место в однолучевой ЛБВ.

* В. Н. Шевчик. Основы электроники сверхвысоких частот. Изд-во «Советское радио», 1959.

Особенностью взаимодействия волны линии с быстрым потоком является его непрерывный переход в электронно-волновое взаимодействие по мере уменьшения фазовой скорости волны линии. Это связано с тем, что волна линии непрерывно переходит в быструю волну пространственного заряда медленного потока, которая совместно с медленной волной пространственного заряда быстрого потока обуславливает электронно-волновое взаимодействие. Это взаимодействие наблюдается в определенных интервалах (указанных ранее) значения параметра неоднородности, зависящих от параметра связи потоков.

Для рассматриваемого случая значения $p = 0,75x_{\min}$ (наименьшее значение параметра неоднородности, при котором существует электронно-

волновое взаимодействие) существенно отлично от x_{\min} для

электронно-волновой лампы. Это, по-видимому, обусловлено пространственным разнесением потоков, что затрудняет эффективный энергообмен между электронными потоками, приводящий к появлению волн с меняющейся амплитудой. В то же время граничное значение параметра неоднородности в рассматриваемом случае сдвигается в сторону больших x по сравнению с электронно-волновой лампой. Однако амплитудное значение постоянных распространения волн оказывается зависящим от параметра b (x уменьшается с ростом b).

На рис. 9 представлена зависимость $x_{\max} = f(x)$ для случая двулучевой ЛБВ и ЭВЛ в относительных единицах.

Следует отметить еще одну особенность взаимодействия волны линии замедления с медленной волной пространственного заряда. В двулучевой

ЛБВ x_{\max} указанного взаимодействия приблизительно в $2\frac{1}{3}$ раза больше x_{\max} однолучевой ЛБВ при одинаковых параметрах B, d, b . Это имеет место при всех значениях параметра h . Данная особенность объясняется присутствием в замедляющей системе двух электронных потоков и их взаимным влиянием на взаимодействие с волной линии. Каждый из потоков взаимодействует с суммарным полем, превышающим поле системы, соответствующей однолучевой ЛБВ, что приводит к повышению эффективности энергообмена между потоком и замедляющей системой.

Таким образом, параметр разности скоростей электронных потоков h имеет важное значение для режимов работы двулучевой ЛБВ. Изменением параметра h можно добиться появления двух нарастающих волн в усилителе, а также изменения в определенных пределах их фазовых постоянных.

Приведенное исследование зависимости корней характеристического уравнения двулучевой ЛБВ от параметра разности скоростей показывает, что в этом случае расширяется полоса усиливаемых частот и возрастает коэффициент усиления. При определенных значениях h возможно одновременное расширение полосы пропускания и увеличение коэффициента усиления.

Авторы признательны А. М. Кобылину, выполнившему программирование и решение задачи на ЭЦВМ.

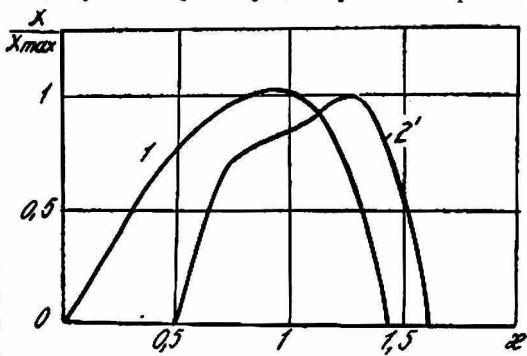


Рис. 9.