

*Б. Н. БОНДАРЕНКО*, канд. физ.-мат. наук,  
*В. Г. КРЫЖАНОВСКИЙ, И. Б. МАКАРЕНКО*

### **АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОННОГО СГУСТКА В АВТОФАЗНОЙ ЛАМПЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

Автофазная ЛБВ (АЛБВ) представляет собой прибор *O*-типа, отличающийся от традиционной ЛБВ организацией пространства взаимодействия. В выходной части прибора создается повышенное по сравнению с группирователем сопротивление связи, а в пролетном канале — электростатическое поле, коллинеарное относительно направления движения электронного потока и изменяющееся в общем случае вдоль длины прибора. При переходе из группирователя в выходную часть прибора электроны захватываются возросшим высокочастотным полем бегущей волны в потенциальную яму. Совершая колебательное движение в продольном направлении на дне потенциальной ямы, отдельные электроны и сгусток в целом осуществляют преобразование энергии постоянного поля в энергию СВЧ-волны при сохранении синхронного перемещения электронного потока и СВЧ-волны. Рассмотренный механизм взаимодействия [1] по принципу энергообмена напоминает физические процессы в приборах магнетронного типа. Изменение знака электростатического потенциала позволяет реализовать режим обратного преобразования [2; 3].

Анализ процессов энергообмена в АЛБВ показал высокую эффективность рассматриваемого механизма в режимах усиления и обратного преобразования СВЧ-колебаний. Некоторые предельные параметры рассматриваемого режима могут быть найдены аналитически [4]. Однако для их реализации необходимо обеспечить высокий процент захваченных электронов. Цель работы — определение параметров замедляющей системы, электронного пуч-

ка и электростатического поля, обеспечивающих получение наиболее полного захвата электронов в потенциальную яму поля бегущей волны.

Захваченный электронный сгусток в АЛБВ не является непосредственным донором энергии, как при баллистическом торможении в ЛБВО. Сгусток выступает в роли промежуточного трансформатора, с помощью которого потенциальная энергия электронов в электрическом поле преобразуется в энергию СВЧ-поля. Выполнение этих функций зависит от параметров сгустка (относительной и абсолютной плотности) и его фазовых отношений с полем. Незахваченные электроны получают энергию от электростатического поля, но не передают ее высокочастотной волне. Таким образом, представляет интерес получение наиболее полного захвата, так как процентом захваченных электронов  $\nu$  определяется максимально достижимый КПД режима с захватом сгустка. Количество захваченных электронов зависит от скачка сопротивления связи и от напряженности высокочастотного поля, напряженности и профиля электростатического поля, приложенного после скачка сопротивления связи, электродинамических параметров автофазной секции.

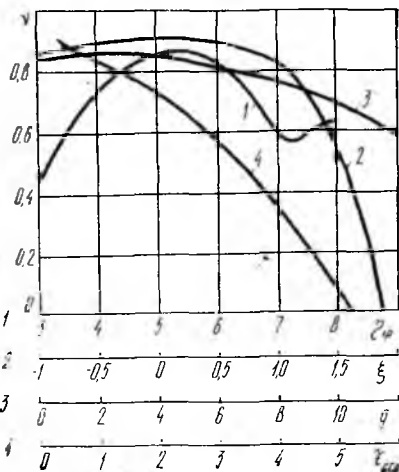
Используя подход, развитый в работе [5], получим аналитическую зависимость предельного числа захваченных электронов от места и значения скачка сопротивления связи в приближении квазистационарности высокочастотного потенциала. Уравнения движения электронов в потенциальной яме представляются в виде уравнения математического маятника. На основе его точного решения в терминах эллиптических функций Якоби несложно получить выражение для асимптотического КПД, т. е. доли захваченных электронов  $\nu$  в момент захвата при выполнении условия  $\varepsilon/\mu \ll \ll 1$ . Здесь  $\varepsilon$  — безразмерная напряженность электростатического поля  $E$ ,  $\varepsilon = E/2\beta U_0$ ;  $U_0$  — ускоряющий потенциал группирователя АЛБВ;  $\mu$  — отношение сопротивления связи после скачка к его значению до скачка;  $\beta$  — фазовая постоянная замедленной волны. В момент времени, равный половине периода колебаний электронов в потенциальной яме, значение  $\nu$  максимально, так как сгусток имеет минимальную фазовую ширину. Предельное значение  $\nu_{\text{макс}} = 1 - \varepsilon/\sqrt{\mu(\mu-1)}$ , т. е. коэффициент захвата растет с уменьшением электростатического поля и увеличением скачка сопротивления связи  $\mu$ .

Детально проанализировать зависимости коэффициента захвата от параметров системы позволяет численное решение уравнений нелинейной теории АЛБВ [1]. Значение  $\nu$  определялось в численной программе путем подсчета количества электронов, совершающих финитное движение относительно поля реальной электромагнитной волны, распространяющейся в приборе. Изучались зависимости коэффициента захвата от длины группирующей секции  $\zeta_{\text{гр}}$ , параметров рассинхронизма  $\xi$  и пространственного заряда  $q$ , электростатического поля  $F_{\text{ст}_0}$  при его постоянном значении вдоль

длины прибора. Принимали  $\mu = 5$ , так как с уменьшением значения  $\mu$  падает значение  $\nu$ , а при его увеличении  $\nu$  увеличивается незначительно, кроме того, получение больших значений  $\mu$  сопряжено с техническими трудностями. На рисунке представлены зависимости коэффициента захвата электронов от перечисленных величин. Постоянные значения параметров для каждой кривой: параметр усиления  $\epsilon_0 = 0,1$ ,  $\zeta_{гр} = 5,5$ ,  $q = 1$ ,  $F_{ст_0} = 1$ ,  $\xi = 1$ ,  $\mu = 5$ , нормированный входной сигнал  $F_0 = 0,1$ .

Используя зависимости, показанные на рисунке, можно оценить частотный и динамический диапазоны АЛБВ, задавшись конкретными значениями параметров замедляющей системы и электронного потока. Кривая 1 показывает наличие четко выраженного максимума зависимости  $\nu(\zeta_{гр})$ , что свидетельствует о существовании оптимальных фазовых соотношений между первой гармоникой сгруппированного тока и высокочастотной волной. Это подтверждает вывод о том [2], что оптимальным местом размещения скачка сопротивления связи является участок между точками максимумов первой гармоникой сгруппированного тока и высокочастотного поля. Повышенная критичность  $\nu$  к длине группирователя объясняется еще и быстрым изменением уровня высокочастотного поля вблизи точки насыщения.

Зависимость  $\nu$  от параметра расстройки скоростей  $\xi$  свидетельствует о большем возможном диапазоне изменения этого параметра. Хотя при уменьшении  $\xi$  снижаются первая гармоника сгруппированного тока (плотность сгустка) и высокочастотная мощность в момент захвата, значение  $\nu$  уменьшается медленно. Такая зависимость  $\nu$  от  $\xi$  связана с благоприятным отношением скорости электронного сгустка и реальной фазовой скорости высокочастотной волны  $\nu_{ф}$  в момент захвата при малых и отрицательных значениях  $\xi$ . Электронный поток в области скачка сопротивления связи движется со скоростью, которая равна или меньше скорости  $\nu_{ф}$ . Сразу после захвата электростатическое поле способствует образованию компактных электронных сгустков в тормозящей фазе высокочастотного поля. Как видно из рисунка (кривая 2), высокие значения коэффициента захвата сохраняются при достаточно большом изменении параметра рассинхронизма в автофазной секции ( $\pm 1,5$ ). С учетом дисперсии фазовой скорости это означает сохранение финитного характера движения в достаточно широком диапазоне частот. Происходящее вследствие группировки



электронов замедление реальной фазовой скорости бегущей волны и ускорение электронов под действием электростатического поля приводит лишь к выравниванию скоростей волны и электронов. Это и обеспечивает высокое значение коэффициента захвата  $\nu$ .

Зависимость  $\nu$  от параметра пространственного заряда  $q$  (кривая 3) показывает, что степень захвата снижается с ростом сил расталкивания внутри электронного сгустка, приводящим к уменьшению глубины потенциальной ямы. Наличие здесь максимума связано с существованием оптимальной длины группирователя  $\epsilon_{gr}$  для каждого значения  $q$ . При увеличении электростатического поля, приводящем к уменьшению глубины потенциальной ямы [1], монотонно уменьшается значение  $\nu$ . Очевидно, что при малых значениях  $F_{ст_0}$  качество захвата выше (кривая 4), однако рост высокочастотной мощности и КПД происходит медленнее, что обуславливает чрезмерное увеличение длины прибора. Как свидетельствует анализ физических процессов в АЛБВ при учете активных потерь [4], для получения максимального КПД необходимо стремиться к получению максимальной скорости роста высокочастотной мощности. В связи с этим при больших потерях условия получения максимального КПД могут не совпадать с условиями получения максимального коэффициента захвата.

Анализ условий захвата электронного сгустка в автофазной ЛБВ свидетельствует о возможности создания эффективного прибора, работающего в достаточно широком диапазоне входных параметров.

**Список литературы:** 1. Бондаренко Б. Н., Крыжановский В. Г. Двухсекционная ЛБВ с автофазной выходной секцией. Сообщ. 1. Вывод рабочих уравнений// Радиотехника. 1979. Вып. 51. С. 112—117. 2. Бондаренко Б. Н., Крыжановский В. Г. Реализация режима обратного преобразования в автофазной ЛБВ// Радиотехника, 1981. Вып. 57. С. 114—118. 3. Falkner A. H. Novel travelling-wave energy converter//IEEE Proc. 1985. I, 132, № 1. P. 1—4. 4. Бондаренко Б. Н., Димашко Ю. А., Крыжановский В. Г. Предельный КПД автофазной ЛБВ//Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1985. Т. 28, № 10. С. 99—101. 5. Бондаренко Б. Н., Димашко Ю. А., Крыжановский В. Г. Влияние условий захвата электронного сгустка на предельный КПД автофазной ЛБВ//XXIX Всесоюз. науч. сес., посвящ. Дню радио: Тез. докл. М., 1984. Ч. 1. С. 126.

Поступила в редколлегию 07.08.86