

УДК 621.385.6

И. И. Воротынцева

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АВТОФАЗНОЙ ЛАМПЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ (ЛБВ) В РЕЖИМЕ ОБРАТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Выяснено влияние поля пространственного заряда, радиальной и азимутальной составляющих ВЧ-поля на величину и характер динамической расфокусировки в автофазной лампе бегущей волны ЛБВ, проведен анализ токооседания.

Ключевые слова: фазовая фокусировка, токооседание, поле пространственного заряда, численные методы.

The influence of the field of space charge, radial and azimuth components of HF-fields on the size and nature of dynamic defocusing in autophase TWT was studied, the analysis of current subsidence was carried out.

Key words: phase focusing, current subsidence, field of space charge, numerical methods.

В литературе существует два противоположных мнения о главных причинах динамической расфокусировки, так, в [1] делается вывод о том, что токооседание связано, в основном, с действием радиальной компоненты ВЧ-поля замедляющей системы (ЗС), а не с полем пространственного заряда (ПЗ); в [2] утверждается противоположное. По-видимому, это связано с тем, что процессы динамической расфокусировки являются одними из наиболее тонких и для их анализа принципиально необходимы трехмерные модели и программы, оперирующие большим числом крупных частиц.

На основе разработанной численной модели проведены исследования расфокусировки электронного потока режима с захватом сгустка [3, 4]. Расчеты проводились для случая фокусировки однородным магнитным полем с полностью экранированным катодом при $B = 65$ мТл. Начальное заполнение пучком пролетного канала выбиралось равным 0,5, распределение плотности тока во входном сечении принималось постоянным.

Анализ фазовых портретов показывает, что динамика фазовой фокусировки в автофазной ЛБВ характеризуется следующими основными этапами: первый — максимум группировки в выходном участке группирователя; второй — захват сгустка на входе автофазной секции, догруппировка сгустка; третий — уширение сгустка, развал на два; четвертый — выход сгустка из состояния захвата.

Первый этап (рис. 1, б) характеризуется образованием основного сгустка в тормозящей фазе поля на выходе группирователя. Динамика частиц в этом случае достаточно простая, и «течение электронной жидкости» является ламинарным. Образуется сгусток, состоящий из заторможенных электронов. Слева ($(3\pi/4) \geq \varphi \geq (-\pi/4)$) в него вливаются ускоренные электроны, движущиеся преимущественно от оси за счет расфокусировки ВЧ-полем. Справа ($(5\pi/4) \geq \varphi \geq (-\pi/4)$) входят слабо заторможенные частицы, которые движутся к оси вследствие фокусирующего действия ВЧ-поля.

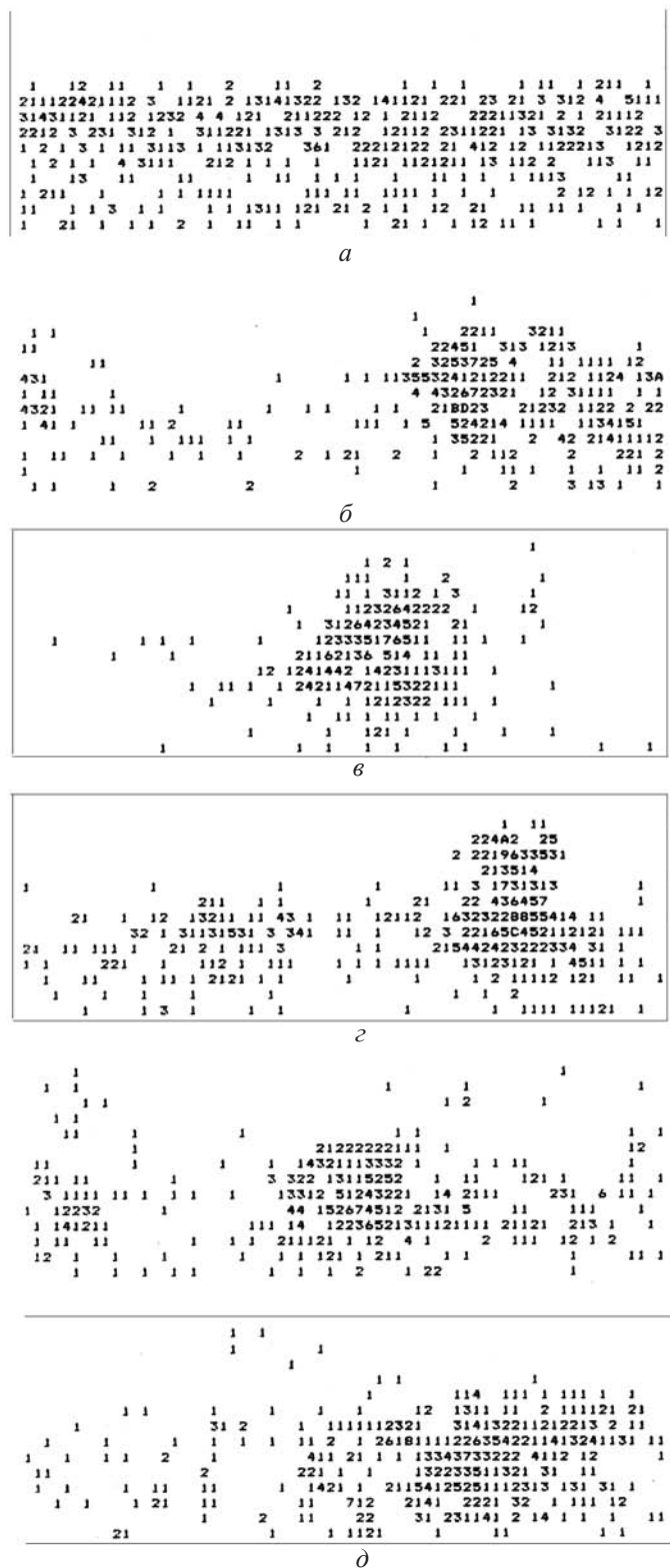


Рис. 1. Пространственно-временные диаграммы электронного потока

В сгустке электроны дополнительно тормозятся, при этом большая часть сильно заторможенных частиц собирается в верхней половине сгустка. Первый этап заканчивается образованием «шлейфа» малого потока медленных электронов вблизи границы ЗС, который движется в противоположном направлении с основным потоком ускоренных частиц (вблизи оси), и формированием сгустка, пригодного для последующего захвата.

Второй этап (рис. 1, в) характеризуется захватом сгустка в потенциальную яму на входе автофазной секции, сопровождающийся частичной догруппировкой электронного потока. Несколько больше становится «шлейф», состоящий из заторможенных электронов, в результате вливания в него группы незахваченных электронов. Поток медленных электронов вблизи ЗС дополнительно тормозится электростатическим полем, в результате электроны, отдавая свою кинетическую энергию тормозящему полю, оседают на замедляющую систему. Этими электронами, в основном, обусловлено локальное токооседание в начале автофазной секции на втором этапе. Движение частиц в самом сгустке носит колебательный характер. Второй этап характеризуется тем, что амплитуда этих колебаний не превосходит глубину потенциальной ямы.

На третьем этапе уменьшается эффективность взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной вследствие искажения формы потенциальной ямы. Факторы, искажающие форму потенциальной ямы и влияющие на характер движения электронов (поле ПЗ, амплитуда первой и второй гармоник ВЧ-поля, статическое электрическое поле), способствуют уширению сгустка и его развалу на два, колеблющихся противофазно. Этот этап характеризуется образованием замкнутого «шлейфа», перекачивающего поток частиц из одного сгустка во второй (рис. 1, г).

Четвертый этап (рис. 1, д) характеризуется выходом сгустка из состояния захвата вследствие обмеления потенциальной ямы. Возникают дополнительные пересечения и хаотизация фазовых траекторий, сгусток «размывается». Происходит интенсивное перемешивание слоев и сильная «турбулизация» потока, структура его не имеет ничего общего с первоначальной структурой на входе автофазной секции. В этом случае растут радиальные и азимутальные скорости электронов, что совместно с увеличением радиуса электронного потока приводит к резкому увеличению динамического токооседания на замедляющую систему. Процесс обратного преобразования энергии прекращается.

Рассмотрение пространственно-временных диаграмм показывает, что движение частиц в сгустках, структура сгустков и разряджений имеет сложный вид. На выходном участке прибора летит не просто периодически пульсирующий электронный поток, а последовательность образований, перестроение структуры которых происходит весьма быстро — примерно за два периода ВЧ-колебаний.

Радиальные смещения, обусловленные динамическими эффектами, начинают появляться уже на участке $z_i = 0,5 \dots 0,6$. Поток с пересекающимися траекториями начинает зарождаться при $z_i > 0,6$, а при $z_i \geq 0,8 \dots 0,9$ поток становится существенно неламинарным. Существенная неламинарность электронного потока приводит к увеличению токооседания на ЗС и совместно с нарушением состояния захвата к уменьшению КПД прибора.

Динамическое токооседание начинается в области максимума первой гармоники тока. За максимумом КПД поток сильно турбулентный, продолжается токооседание. Турбулизация приводит к тому, что на периферии электронного потока имеются электроны из всех слоев пучка.

Из анализа расчетных данных следует, что замедленные электроны, обладая большими азимутальными и радиальными скоростями, могут находиться на разных расстояниях от оси, тогда как более быстрые электроны стягиваются в приосевую область.

Расчет плотности частиц на выходе автофазной секции ($z_i = 0,5 \dots 0,6$) показал, что плотность крупных частиц в сгустке при условии сохранения состояния захвата превышает среднее значение примерно в 2,5 раза, а в разряжениях меньше средней примерно в 3 раза. В то же время объемная плотность вследствие изменения радиуса электронного потока в сгустках оказывается меньше. Оценка кулоновских сил показала, что они на периферии сгустков примерно в два раза больше, чем на периферии разряжений.

Из анализа следует, что в выходной части автофазной секции при нарушении условия захвата, ввиду обмеления потенциальной ямы, токооседание обусловлено не только периферийными расфокусированными электронами, постепенно приближающимися к стенкам пролетного канала под действием тормозящего электростатического поля, но также и перефокусированными крупными частицами, последние перед оседанием устремляются к оси и пересекают ее.

Физический смысл этого явления заключается в следующем. В турбулентном потоке каждая частица движется в значительной степени обособленно, все остальные создают по отношению к ней фон. «Ореол» наблюдается не потому, что замедленные электроны «выжимаются» на периферию электронного потока и выбывают из него в силу нарушения условия захвата, а вследствие того, что они распределены по всему объему его турбулентной части, в то время как быстрые электроны стягиваются в приосевую область.

Рассмотрение нелинейных эффектов в автофазной ЛБВ на основе трехмерной модели позволяет сделать вывод, что расфокусировка электронного потока в динамическом режиме определяется, прежде всего, увеличением плотности ПЗ в захваченном сгустке, а затем уже радиальным и азимутальным полем спирали. Последние начинают действовать в выходной части автофазной секции при выходе большого числа электронов из состояния захвата и частичной расфокусировки электронного потока под действием сил поля ПЗ, что приводит к локальному токооседанию. Существенная неламинарность электронного потока, увеличивающая токооседание на ЗС, совместно с нарушением состояния захвата снижает КПД прибора.

Анализ фазовых портретов, а также распределение плотности ПЗ (рис. 2), соответствующее второму этапу динамики фазовой фокусировки, подтверждают, что процесс обратного преобразования энергии связан с захватом сгустка, возросшим на входе автофазной секции, ВЧ-полем и смещением его под действием тормозящего электростатического поля в ускоряющую фазу ВЧ-волны. По мере обмеления потенциальной ямы сгусток начинает рассасываться. Искажение формы потенциальной ямы приводит к формированию второго сгустка

(рис. 3), вплоть до захвата его полем второй гармоники, что замедляет рост КПД. В точке максимального КПД образуются два сгустка приблизительно равной плотности, расположенные симметрично относительно фазы волны. Дальнейшее обмеление ямы приводит к полному развалу сгустка и выходу его из состояния захвата.

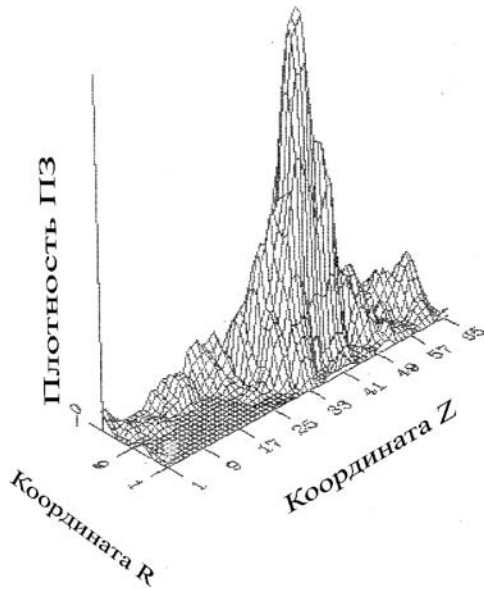


Рис. 2. Распределение плотности ПЗ на одной длине волны (второй этап динамической фокусировки)

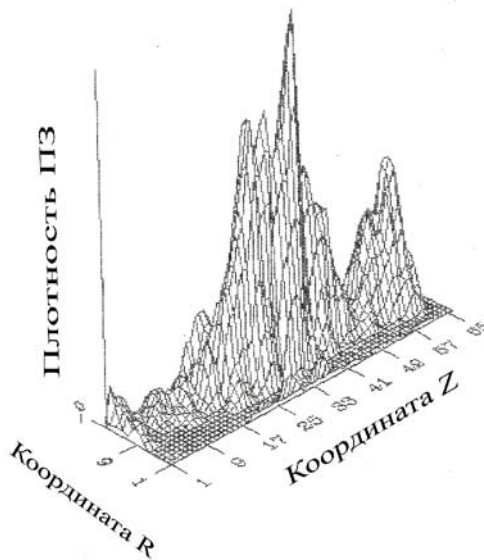


Рис. 3. Распределение плотности ПЗ на одной длине волны (третий этап динамической фокусировки)

Таким образом, механизм достижения максимального преобразования ВЧ-мощности сопровождается постепенным обмелением потенциальной ямы, развалом сгустка и выходом его из состояния захвата. Токооседание происходит в локальных областях и обусловлено незахваченными электронами и частицами, вышедшими из состояния захвата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кац А. М., Ильина Е. М., Манькин И. А. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. М. : Советское радио, 1975. 295 с.
2. Солнцев В. А., Ведяшкина К. А., Семина Т. С. Анализ двумерных нелинейных эффектов в ЛБВ // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1977. Вып. 6. С. 53—69.
3. Bondarenko B. N., Vorotyntseva I. I. The numerical modeling of the autophase TWT in the intensification regime // Physics in Ukraine. Kiev, 1993. P. 28—30.
4. Бондаренко Б. Н., Воротынцева И. И. Автофазный СВЧ-конвертор с многократным вводом энергии // Радиотехника. Харьков : Вища школа, 1990. Вып. 95. С. 29—35.

1. Kats A. M., Il'ina E. M., Man'kin I. A. Nelineynye yavleniya v SVCh priborakh O-tipa s dlitel'nym vzaimodeystviem. M. : Sovetskoe radio, 1975. 295 s.
2. Solntsev V. A., Vedyashkina K. A., Semina T. S. Analiz dvumernykh nelineynykh effektiv v LBV // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh. 1977. Vyp. 6. S. 53—69.
3. Bondarenko B. N., Vorotyntseva I. I. The numerical modeling of the autophase TWT in the intensification regime // Physics in Ukraine. Kiev, 1993. P. 28—30.
4. Bondarenko B. N., Vorotyntseva I. I. Avtofaznyy SVCh-konvertor s mnogokratnym vvodom energii // Radiotekhnika. Khar'kov : Vishcha shkola, 1990. Vyp. 95. S. 29—35.

© Воротынцева И. И., 2012

Поступила в редакцию
в октябре 2012 г.

Ссылка для цитирования:

Воротынцева И. И. Динамические процессы в автофазной лампе бегущей волны (ЛБВ) в режиме обратного преобразования // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 3(23).