

*Письма в ЖЭТФ, том 16, вып. 11, стр. 602 – 606*

*5 декабря 1972 г.*

## **ОДНОМОДОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОГО РАЗРЯДА**

*В.А. Лавровский, И.Ф. Харченко, Е.Г. Шустин*

В многочисленных экспериментальных исследованиях показано, что для развития пучковых неустойчивостей в плазме типично возбуждение шумоподобных колебаний с широким непрерывным спектром частот и образование плато на функции распределения.

Эти результаты находятся в видимом противоречии как с выводами линейной теории когерентного взаимодействия частиц с волнами, предсказывающей «монохроматизацию» волнового пакета по мере нараста-

ния волны [1, 2], так и с развитой в последние годы нелинейной теорией взаимодействия, учитывающей захват частиц и образование сгустков электронов ("макрочастиц") в поле возбуждаемой волны [3, 4].

Ранее показано [5], что измерения функции распределения электронов, проведенные в условиях, позволивших исключить временное усреднение измеряемых величин, дают многогорбую форму кривой  $f(v)$ , соответствующую выводам нелинейной теории взаимодействия частиц с квазимонохроматической волной.

В данной работе проведен анализ "мгновенных" характеристик возбуждаемого в системе высокочастотного поля, измеряемых за интервал времени, существенно меньший характерного времени изменения параметров разряда. Этот анализ подтвердил применимость нелинейной теории "одномодового" взаимодействия к плазменно-пучковому разряду, несмотря на то, что усредненные характеристики процесса говорят о его стохастическом характере.

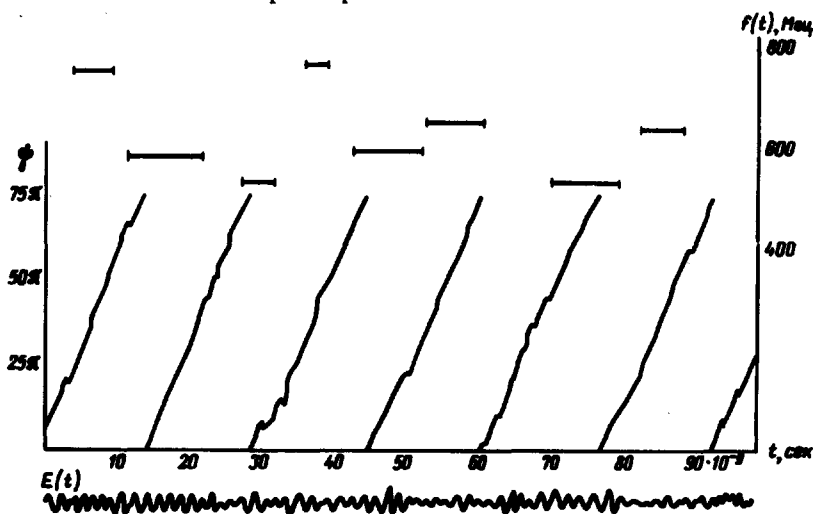


Рис. 1. Типичная осциллограмма ВЧ поля  $E(t)$ , текущая фаза колебаний  $\Psi(t)$  и мгновенная частота квазигармонических включений  $f(t)$

Измерения проводились в плазменно-пучковом разряде в водороде при непрерывной инжекции электронного пучка с энергией  $1 \text{ кэВ}$  при токе  $20 - 40 \text{ ма}$  [6]. Как известно, в такой системе в режиме с плато на функции распределения возбуждаются интенсивные высокочастотные колебания с широким непрерывным спектром вблизи электронной плазменной частоты. В этом же режиме были проведены измерения функции распределения при подаче на анализатор с тормозящим потенциалом пилообразного напряжения длительностью  $2,5 \cdot 10^{-7} \text{ сек}$  и фиксировалась временная структура высокочастотных колебаний за интервал времени, равный  $10^{-7} \text{ сек}$ . Измерительная схема работала в режиме однократного запуска в случайные моменты времени при непрерывной инжекции электронного пучка.

На рис. 1 представлена типичная осциллограмма колебаний  $E(t)$ . Статистический анализ осциллограмм проводился с помощью ЭВМ.

Вид автокорреляционной функции исследуемого колебательного процесса (рис. 2) соответствует колебаниям с периодическими составляющими. Время корреляции случайной части процесса порядка нескольких наносекунд. Относительная интенсивность периодической составляющей определенная по амплитудным значениям функции  $R(\tau)$  при  $\tau > \tau_{\text{кор}}$  равна  $0,1 \pm 0,15$ .

Спектр частот (рис. 3) более узкий, чем усредненный спектр измеренный волномером (пунктирная кривая). Спектры частот отдельных реализаций неравномерны — выделяются отдельные спектральные составляющие значительной амплитуды. Средняя частота колебаний и области максимальной интенсивности изменяются от реализации к реализации. Усреднение по ансамблю таких спектров перекрывает диапазон частот от 250 до 1500 МГц, что совпадает с частотной характеристикой, полученной при измерениях за большие интервалы времени (пунктирная кривая).

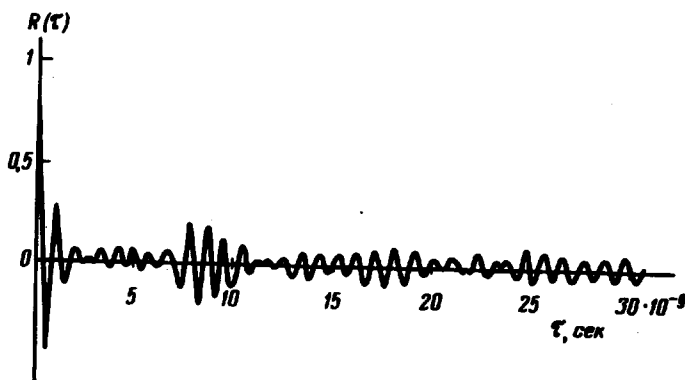


Рис. 2. Автокорреляционная функция колебания, представленного на рис. 1

Динамику изменения текущей частоты колебательного процесса во времени позволяет проследить применение фазово-частотного анализа [7]. Сущность метода заключается в представлении колебательного процесса в виде  $E(t) = A(t) \cos \Psi(t)$  и определения амплитудных и фазовых характеристик на основе преобразований Гильберта [8].

С помощью этого метода в случайном процессе можно, в частности, выделить локально-стационарные по частоте квазигармонические включения и определить их характерную частоту на  $\omega = d\Psi/dt$ . Такие включения на кривой  $\Psi(t)$  будут иметь вид прямолинейных участков.

Результаты анализа приведены на рис. 1 в виде кривой  $\Psi(t)$  и диаграммы изменения текущей частоты процесса во времени  $f = \omega/2\pi = f(t)$ . На кривой  $\Psi(t)$  можно наблюдать наличие квазигармонических включений и резкие изменения фазы колебаний. Из диаграммы  $f(t)$  видно, что колебания существуют в основном в четырех частотных областях (530, 580 — 590, 630 — 640 и 750 — 760 МГц), которые чередуются во времени, по-видимому, случайным образом. Время существования таких

квазигармонических включений составляют  $(5:10) \cdot 10^{-9}$  сек, т. е. несколько периодов. Как правило, перестройка частоты сопровождается скачками фаз на  $70 + 180^\circ$ . Просуммировав время существования отдельных частотных составляющих, получим величины, характеризующие распределение вероятностей возбуждения этих частот. Оказывается, что составляющие этого распределения соответствуют наиболее интенсивным составляющим в спектральном разложении  $S(f)$  исследуемой реализации (рис. 3). Таким образом, результаты исследования временной структуры колебательного процесса при развитии неустойчивости в системе плазма-пучок указывают на то, что взаимодействие электронного пучка с плазмой в основе своей является когерентным, несмотря на то, что усредненные спектры свидетельствуют о стохастическом характере процесса.

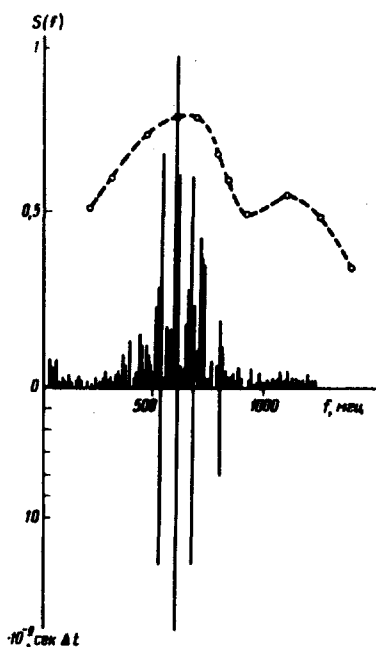


Рис. 3. Фурье-преобразование осциллограммы  $E(t)$  в сравнении с усредненным спектром (пунктирная кривая) и вероятностным распределением квазигармонических включений  $\Delta t(f)$

Этот вывод подтверждается также результатами измерений функции распределения электронов [5]. Как и следует из нелинейной теории взаимодействия пучка с квазимонохроматической волной в плазме, функция распределения, измеренная за время  $10^{-7}$  сек, малое по сравнению с периодом низкочастотных флуктуаций в разряде, имеет вид многогорбой кривой.

Функция распределения, измеренная в том же режиме за длительное время, имеет вид плато, что является результатом усреднения изменяющейся во времени функции распределения.

Таким образом, усредненные характеристики как ВЧ колебаний, так и состояния пучка маскируют истинный характер взаимодействия.

Причинами быстрой перестройки частоты колебаний, обуславливающими стохастичность усредненных характеристик системы (сплошной шумоподобный частотный спектр и платообразная функция распре-

ления) могут являться неустойчивости колебаний на отдельных частотах, вызванные низкочастотными колебаниями, связью различных собственных мод [9] или возбуждением в спектре саттелитов за счет периодических колебаний сгустков в потенциальной яме возбуждаемой волны [4]. Развитие методов анализа мгновенных характеристик пучковой неустойчивости открывает возможность идентификации указанных эффектов.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
25 октября 1972 г.

### Литература

- [1] А.И.Ахиезер, Я.Б.Файнберг. ДАН СССР, 59, 559, 1949; ЖЭТФ, 21, 1962, 1951; 75, 1851, 1949; 75, 1864, 1949.
- [2] W.Drummond, T.O'Neil, J.Malmberg, J.Thomson. Phys. Fluids, 13, 2422, 1970.
- [3] Б.Б.Кадомцев, О.П.Погуце. 25, 1155, 1970.
- [4] В.Д.Шапиро, В.И.Шевченко. ЖЭТФ, 57, 2066, 1969.
- [5] В.А.Лавровский, Е.Ф.Шустин, И.Ф.Харченко. Письма в ЖЭТФ, 15, 84, 1972.
- [6] Е.Ф.Шустин, В.П.Попович, И.Ф.Харченко. ЖТФ, 39, 993, 1969.
- [7] И.Ф.Харченко, О.В.Бецкий, М.М.Толмачев, А.Т.Полухин. Радиотехника и электроника, 1972 г. (в печати)
- [8] А.М.Трахман. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов, М., изд. Советское радио, 1972.
- [9] А.С.Бакай. Аннотация докладов конференции по теории плазмы. Киев, 1971 г., стр. 80; Диссертация ФТИ АН УССР, Харьков, 1971 г.