

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК – ОБРАТНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА**

*Б.П. Безручко, С.П. Кузнецов, Д.И. Трубецков*

Приведены экспериментальные данные, показывающие, что в системе электронный пучок – обратная электромагнитная волна при увеличении тока имеет место последовательность небольшого числа бифуркаций, завершающаяся возникновением автоколебаний со сплошным спектром.

В последнее время широко обсуждается вопрос о стохастических автоколебаниях в распределенных динамических системах различной фи-

зической природы [1 – 5]. Стохастические автоколебания характеризуются сплошным спектром, достаточно большой интенсивностью и подчиняются законам подобия, устанавливаемым на основании уравнений динамики рассматриваемой системы<sup>1)</sup>. Наиболее известный пример стохастических автоколебаний – гидродинамическая турбулентность (критерий подобия течений – равенство соответствующих чисел Рейнольдса).

В ряде недавних работ, как теоретических [1], так и экспериментальных [2] (см. также обзоры [3, 4]) были выдвинуты аргументы в пользу того, что переход к турбулентности в гидродинамических системах при увеличении числа Рейнольдса происходит после небольшого числа бифуркаций, тогда как предложенная ранее картина Ландау [6] рассматривала турбулентность как результат последовательного возникновения большого числа движений с несоизмеримыми частотами. Согласно [1], "турбулентность" (стохастические автоколебания) – типичное явление для весьма широкого класса распределенных динамических систем.

В данной работе приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о возникновении стохастических автоколебаний в системе электронный пучок – обратная электромагнитная волна.

Исследуемая система представляет собой отрезок электродинамической линии передачи, согласованный на концах и пронизываемый электронным пучком. Пучок взаимодействует с волной, фазовая скорость  $v_{\phi}$  которой близка к скорости электронов  $v_0$ , а групповая скорость  $v_{гр}$  направлена навстречу пучку. Выходной сигнал снимается с того же конца линии, с которого встреливается пучок. Как показывает теоретический анализ [7], при использовании ряда упрощающих предположений, динамика такой системы определяется единственным безразмерным параметром:

$$l = \beta L^3 \sqrt{IK/4U},$$

где  $\beta = 2\pi f/v_{\phi}$ ;  $f$  – частота, на которой реализуется синхронизм между электронами и волной:  $v_0 = v_{\phi}(f)$ ;  $I$  – ток пучка;  $U$  – ускоряющее напряжение;  $K$  – величина с размерностью сопротивления, связывающая мощность волны  $P$  и амплитуду продольной составляющей ее электрического поля  $E$ :  $P = E^2/2\beta^2 K$ . Далее будем использовать модифицированный параметр  $l' = l/l_M$ , где  $l_M$  отвечает возникновению автомодуляции [7, 8] (см. также рис. 1, 2б). Согласно теории [7],  $l_M \approx 2,9$ .

Для различных значений напряжения  $U$  в эксперименте можно было, увеличивая ток пучка, наблюдать несколько бифуркационных переходов (рис. 1, 2).

При  $l' \lesssim 0,8$  автоколебания отсутствуют. При  $0,8 \lesssim l' < 1$  имеют место автоколебания с частотой, близкой к  $f$  (рис. 2, а). При  $1 < l' \lesssim 2$  наблюдаются многочастотные колебания – режим автомодуляции [7, 8], рис. 2, б. Расстояние по частоте между соседними спектральными составляющими (частота модуляции) составляет по порядку величин

<sup>1)</sup>Последнее представляется важным, поскольку позволяет отличить стохастические автоколебания от случая, когда сплошной спектр обусловлен усилением микроскопических флуктуаций в данной системе.



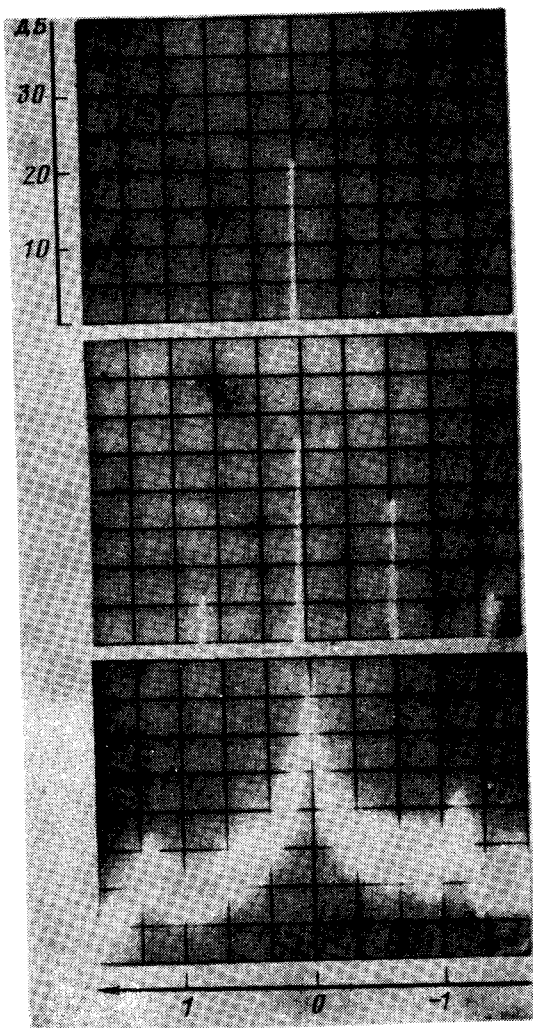


Рис. 2. Спектр выходного сигнала системы в режимах, отмеченных на рис. 1 крестиками. По оси абсцисс отложена нормированная отстройка частоты  $\Delta f (L/v_0 + L/v_{гр})$ . Масштаб по оси ординат логарифмический

Таким образом, в системе электронный пучок – обратная электромагнитная волна при достаточно больших значениях параметра  $l$  ( $l > l_{кр} \sim 6$ ) наблюдаются стохастические автоколебания. Характер перехода системы в этот режим при увеличении  $l$ , по-видимому, подтверждает концепцию Рюэлля – Такенса. [1]. Отметим, что бифуркации, непосредственно предшествующие возникновению стохастических автоколебаний (см. вторую сноску), очевидно, чувствительны к малым возмущениям системы и поэтому не носят универсального характера. Подчеркнем в этой связи, что сам режим стохастических автоколебаний был устойчивым и существовал в области, заштрихованной на рис. 1, вплоть до максимально достижимых токов.

Саратовский  
государственный университет  
им. Н.Г.Чернышевского

Поступила в редакцию  
27 ноября 1978 г.

## Литература

- [1] D.Ruelle, F.Takens. *Comm. Math. Phys.*, **20**, 167, 1971.
  - [2] J.P.Gollub, H.L.Swinney. *Phys. Rev. Lett.*, **35**, 927, 1975.
  - [3] А.С.Монин. *УФН*, **125**, 97, 1978.
  - [4] М.И.Рабинович. *УФН*, **125**, 123, 1978.
  - [5] А.С.Пиковский, М.И.Рабинович, В.Ю.Трахтенгерц. *ЖЭТФ*, **74**, 1366, 1978.
  - [6] Л.Д.Ландау. *ДАН СССР*, **44**, 339, 1944.
  - [7] Н.С.Гинзбург, С.П.Кузнецов, Т.Н.Федосеева. *Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика*, **21**, 1037, 1978.
  - [8] Б.П.Безручко, С.П.Кузнецов. *Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика*, **21**, 1053, 1978.
  - [9] В.И.Арнольд. *Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений*. М., изд. Наука, 1978, глава 6.
-