

Письма
в

ЖУРНАЛ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ

и
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ

ФИЗИКИ

Том 29

Выпуск 3

5 февраля 1979 г.

 Издательство · Наука ·

Письма в ЖЭТФ, том 29, вып. 3, стр. 180 – 184

5 февраля 1979 г.

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

Б.Л. 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 системы¹⁾. 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_{ϕ} которой близка к скорости электронов v_0 , а групповая скорость v_{gr} 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 величини

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

ны $f_M \sim (L/v_0 + L/\tau_{\text{пр}})^{-1} \ll f$; с увеличением тока частота f_M несколько возрастает¹⁾. При $l' > 2$ возникают стохастические автоколебания (рис.2, в). Об их относительной интенсивности можно судить, сравнивая между собой приведенные фотографии. Большая интенсивность этих колебаний; выполнение с достаточной точностью закона подобия (на рис.1 точки, отвечающие возникновению стохастических автоколебаний при различных U лежат вблизи линии $l' = \text{const}$); наличие эффективной синхронизации при введении в систему внешнего гармонического сигнала (при этом стохастические автоколебания срываются и восстанавливается режим автомодуляции) позволяют утверждать, что колебания со сплошным спектром обусловлены динамическими свойствами системы, а не усилением малых флуктуаций.

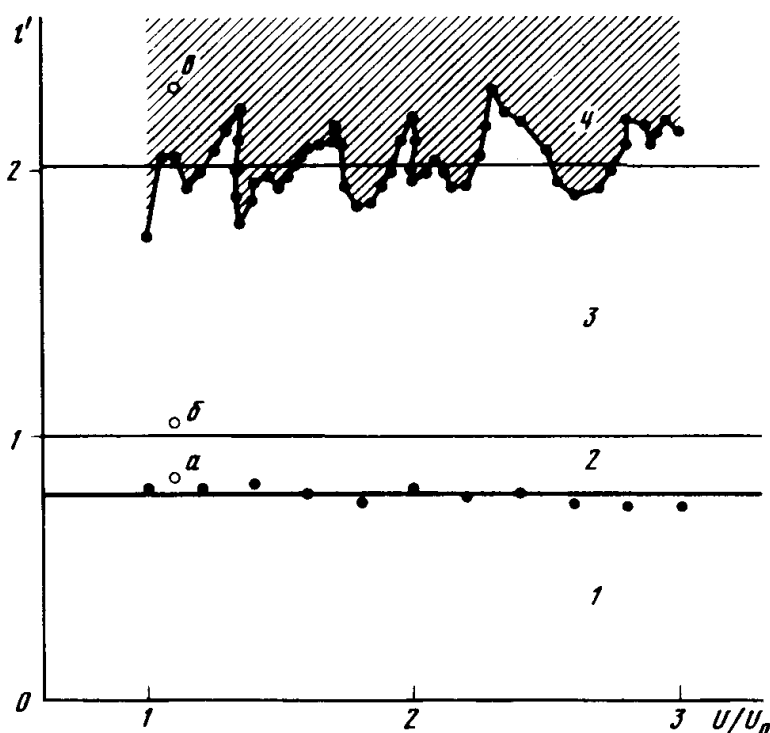


Рис. 1. Области существования различных режимов в исследуемой системе: 1 – генерация отсутствует, 2 – одночастотные автоколебания, 3 – автомодуляция, 4 – стохастические автоколебания. Точками обозначены границы областей, найденные экспериментально; сплошные линии – результат усреднения. Крестики соответствуют режимам рис.2

¹⁾ В области $1 < l' \lesssim 2$ можно было наблюдать небольшое число бифуркаций, характер которых был разным при различных ускоряющих напряжениях и условиях встречи электронного пучка. Иногда переходу к стохастическим автоколебаниям предшествовало появление модуляции с частотами $f_M/2$, $f_M/3$ и т.д.; иногда наблюдались колебания со сплошным спектром, которые существовали в малых интервалах изменения тока. Эти наблюдения, по-видимому, согласуются с картиной, описанной Арнольдом [9].

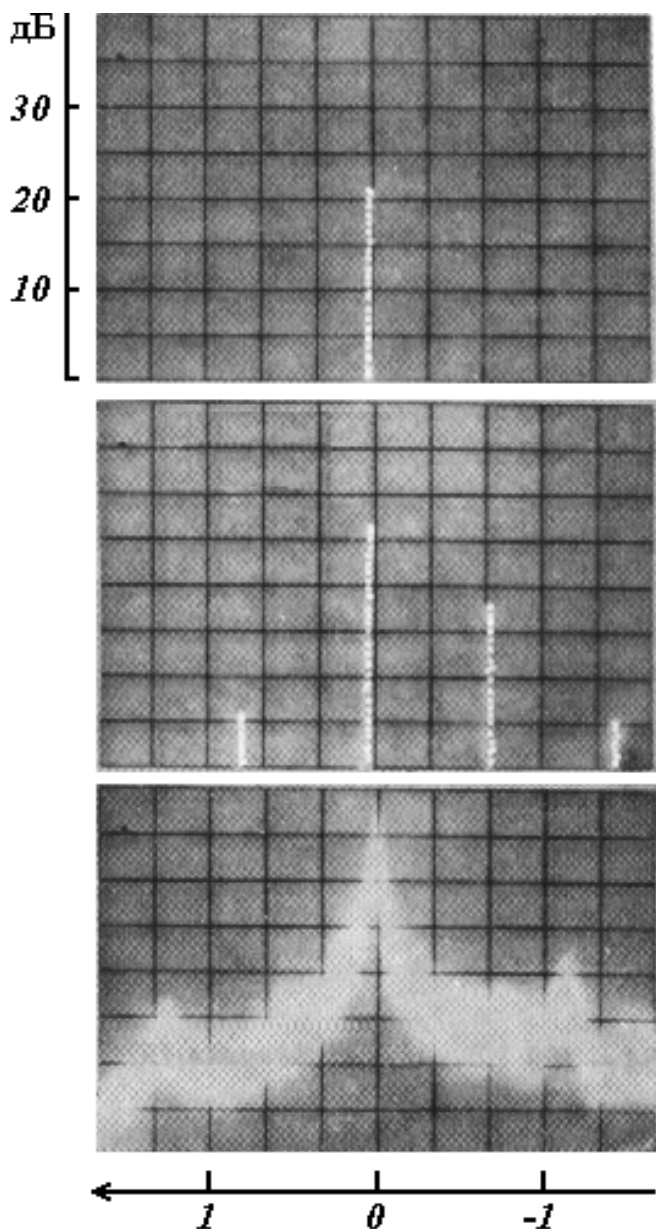


Рис.2. Спектр выходного сигнала системы в режимах, отмеченных на рис.1 крестиками. По оси абсцисс отложена нормированная отстройка частоты $\Delta f (L/v_o + L/v_{гр})$. Масштаб по оси ординат логарифмический

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.
-