

09; 10

© 1991

К ТЕОРИИ АВТОМОДУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
В РЕЛЯТИВИСТСКОМ КАРСИНОТРОНЕ

А.О. Островский, Ю.В. Ткач

В работе [1] впервые в рамках нелинейной нестационарной теории была рассмотрена динамика автоколебательных процессов в релятивистском карсинотроне. Показано, что в данной динамической системе возможна эффективная реализация сложных автомодуляционных режимов генерации ВЧ полей. При анализе физических закономерностей установления этих режимов основным является вопрос о механизме перехода динамической системы от регулярной автомодуляции к стохастической [2, 3]. Решение указанной задачи в слабoreлятивистском случае  $\gamma_0 \sim 1$  ( $\gamma_0$  - релятивистский фактор пучка) проведено в работах [1, 4, 5] методом численного моделирования процессов установления колебаний. Из описания перехода динамической системы к режиму нерегулярной автомодуляции следует, что он, по-видимому, связан со сценарием возникновения хаоса по Рюэлю-Такенсу [6].

Продвижение в релятивистскую область фазовых скоростей показало, что сложные автомодуляционные режимы генерации типичны и для ультрарелятивистского карсинотрона с достаточно высоким КПД [1, 5]. Причем автомодуляция возникает при меньших токах пучка по сравнению со случаем  $\gamma_0 \sim 1$ . В этой связи представляет интерес исследование возможных механизмов стохастизации автоколебаний в релятивистском карсинотроне. Данная работа и посвящена решению этой задачи. Впервые сообщается, что продвижение в область больших энергий пучков может привести к изменению механизма перехода системы к режиму автостохастических колебаний. Установлено, что такой переход происходит через последовательность бифуркаций удвоения периода, которые в слабoreлятивистском случае не наблюдаются.

2. Для исследования автоколебательных процессов в системе электронный пучок-обратная электромагнитная волна использована следующая модель. Электродинамическая структура представляет собой согласованный на обоих торцах отрезок слабоффрированного волновода со средним радиусом  $R_0$  и длиной  $L$ . Вдоль волновода движется тонкий трубчатый релятивистский электронный пучок (РЭП) со средним радиусом  $R_B$ . Волновод помещен в сильное продольное магнитное поле, так что движение электронов можно считать одномерным. Кроме этого, будем считать, что пучок находится в черенковском резонансе с первой пространственной гармоникой основной радиальной моды обратной волны вдали от границы полосы

прозрачности:  $\omega_0 = (k_0 - h)v_0$ ,  $k_0 = 2\pi/D$  - пространственное волновое число замедляющей структуры,  $D$  - период гофрированного волновода,  $v_0$  - начальная скорость РЭП,  $h$  - продольное волновое число,  $\omega_0$  - резонансная частота.

В условиях черенковского резонанса нестационарное взаимодействие РЭП с обратной волной может быть описано следующей системой уравнений [7, 8]:

$$\partial F / \partial \tau - \beta_g \partial F / \partial \xi = \nu \int_{\tau}^{\tau+2\pi} e^{i\theta} d\theta_0, \quad (1)$$

$$d\theta / d\xi = \beta_0 \sqrt{1+q^2} / q - 1, \quad (2)$$

$$dq / d\xi = -\sqrt{1+q^2} \operatorname{Re} [F e^{-i\theta}] q^{-1}. \quad (3)$$

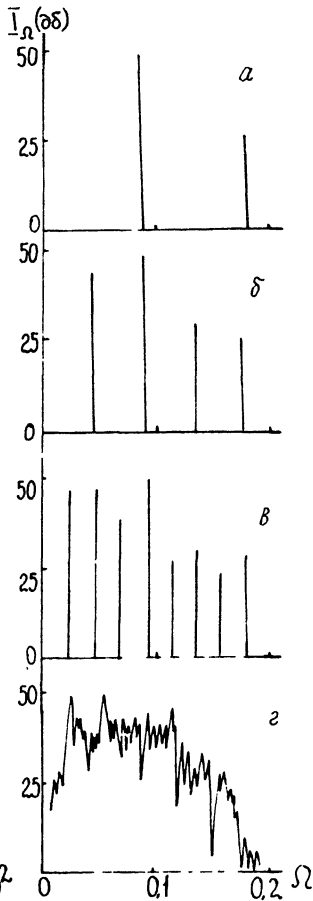
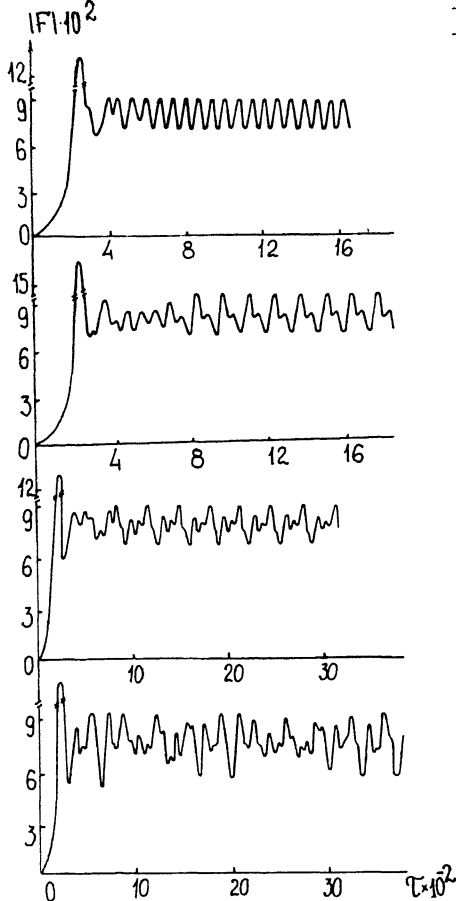
Здесь введены следующие безразмерные переменные и параметры:  $F = E a_1 I_0 (\mathcal{K} R_g) e \nu_0 / mc^2 \omega_0$ ,  $E$  - напряженность электрического поля резонансной волны,  $a_1$  - амплитуда первой пространственной гармоники,  $\mathcal{K} = (k_0 - h) / \gamma_0$ ,  $I_0$  - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка,  $e$ ,  $m$  - заряд и масса электрона,  $\tau = \omega_0(t - z/v_0)$ ,  $\xi = \frac{\omega_0}{v_0} z$ ,  $\beta_0 = \frac{v_0}{c}$ ,  $\beta_g = v_g / (v_g + v_0)$ ,  $v_g$  - групповая скорость волны,  $q = p/mc$ ,  $p$  - значения импульсов электронов пучка,  $\theta$  - фаза электронов относительно синхронной волны,  $\theta_0 = \theta(\xi=0)$ ,  $\gamma = I_B K c \beta_g / 2\pi I_A$ ,  $I_A = \frac{mc^3}{e}$ ,  $I_B$  - ток пучка,  $K$  - сопротивление связи. Отметим, что в отличие от [1, 4, 5] мы не требовали при записи уравнений движения (2), (3) малого изменения скорости частиц в процессе их взаимодействия с резонансной волной. Это вызвано необходимостью более полного выявления особенностей нелинейной перегруппировки электронов пучка при  $\gamma_0^2 \gg 1$ , с которой, как известно [5], связано возникновение автомодуляционных режимов генерации.

Приведенную систему уравнений необходимо дополнить начальными и граничными условиями, имеющими в отсутствие предварительной модуляции пучка вид:

$$F(\tau, \xi=1) = 0, \quad F(\tau=0, \xi) = F_0, \quad l = \frac{\omega_0}{v_0} L, \quad (4)$$

$$\theta|_{\xi=0} = \theta_0 \varepsilon[\tau, \tau+2\pi], \quad q|_{\xi=0} = \beta_0 \gamma_0.$$

Электронный КПД генератора определяется выражением:



Зависимости от времени амплитуды обратной волны при  $\xi = 0$  и спектры огибающей выходного сигнала в установившемся режиме генерации  $I_{\Omega}$  (дБ) для различных значений параметра  $l$  (а -  $l = 50$ , б -  $l = 69$ , в -  $l = 76$ , г -  $l = 78$ ).  $\Omega = \omega/\omega_0$ .

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \int_{\tau}^{\tau+2\pi} \frac{(\gamma_0 \sqrt{1+q^2})}{\gamma_0 - 1} d\theta_0. \quad (5)$$

3. Решение системы уравнений (1)–(3) проведено численными методами для следующих параметров:  $\gamma_0 = 3$ ,  $a_1 = 0.22$ . Значение резонансной частоты и продольного волнового числа находим из соотношений, определяющих условие черенковского синхронизма РЭП с обратной волной замедляющей структуры [9]:

$$\omega_0 = (k_0 - h)v_0, \quad k_0 - h = \frac{k_0}{2} \left[ 1 + \left( \frac{\lambda}{k_0 R_0} \right)^2 \right], \quad \lambda = 2.405. \quad (6)$$

Отсюда при условии  $R_0/D \approx 1$  получим  $\approx R_0 \approx 1$ ,  $v_g/v_0 = 0.55$ . Значение  $v$  выбрано равным  $v = 6 \cdot 10^{-4}$  на плоскости параметров  $(v, l)$ , приведенной в работе [10], из условия установления стационарного режима генерации, близкого к оптимальному по КПД. При расчетах начальное значение поля задавалось следующим:  $Re F_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $Im F_0 = 0$ .

Таким образом, фиксируя ток пучка и изменяя длину волновода, рассмотрим характер процесса возбуждения ВЧ колебаний в распределенной системе РЭП—обратная электромагнитная волна. При  $l \lesssim 38$  система не возбуждается. Для значений  $l$ , находящихся в интервале  $38 \lesssim l \lesssim 45$ , переходный процесс заканчивается установлением стационарного режима генерации. Переходный процесс в этой области значений  $l$  носит характер затухающих осцилляций амплитуды резонансной с пучком волны. Для стационарного режима генерации картина распределения поля вдоль пространства взаимодействия аналогична, имеющему место в слаборелятивистском случае: в направлении движения РЭП амплитуда обратной волны монотонно убывает до нуля на коллекторном конце лампы. При  $l \gtrsim 45$  происходит срыв стационарного режима генерации и в системе устанавливается режим регулярной автомодуляции. По мере дальнейшего роста параметра неравновесности динамической системы наблюдаются две бифуркации удвоения периода (см. рисунок). В результате этих бифуркаций происходит обогащение спектра огибающей выходного сигнала новыми субгармониками. Начиная с  $l \gtrsim 78$ , в динамической системе устанавливается стохастическая автомодуляция. При этом, как следует из рисунка, дискретный спектр размывается и становится сплошным. По первым бифуркационным значениям параметра  $l$  была вычислена скорость перехода к нерегулярной автомодуляции  $\delta_1 = (l_2 - l_1) / (l_3 - l_2) \approx 4.1$ , величина которой близка к универсальной константе Фейгенбаума  $\delta = 4.66920\dots$  [11]. Выявление большего числа бифуркационных значений  $l_n$  является сложной задачей ввиду экспоненциального убывания расстояния между двумя последовательными бифуркациями удвоения периода.

Отметим, что с увеличением  $l$  среднее значение электронного КПД существенно не менялось и находилось на уровне  $\eta \approx 16-18\%$ . Это обстоятельство весьма ценно с практической точки зрения, т.к. оно означает, что в релятивистском карсинотроне автомодуляционные режимы генерации могут быть эффективно реализованы в широком интервале параметров электродинамической системы.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Г и н з б у р г Н.С., К у з н е ц о в С.П., Ф е д о с е е в а Т.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 7. С. 1037-1052.

- [2] Рабинovich М.И. // УФН. 1978. Т. 125. В. 1. С. 123-168.
- [3] Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика. М.: Мир, 1984. 528 с.
- [4] Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. В кн.: Нелинейные волны. Стохастичность и турбулентность. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 29-36.
- [5] Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П. В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький. ИПФ АН СССР. 1981. С. 101-144.
- [6] Рюэль Д., Такенс Ф. В кн.: Странные аттракторы / Под ред. Синая Я.Г., Шильникова Л.П. М.: Мир, 1981. С. 117-151.
- [7] Бондаренко В.А., Островский А.О., Ткач Ю.В. Препринт ХФТИ, 88-28 1988. С. 7.
- [8] Бондаренко В.А., Островский А.О., Ткач Ю.В. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 6. С. 134-137.
- [9] Курилко В.И., Кучеров В.И., Островский А.О., Ткач Ю.В. // ЖТФ. 1979. Т. 49. № 12. С. 2569-2575.
- [10] Ковалев Н.Ф., Петрухина В.И., Сморгонский А.В. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 7. С. 1547-1550.
- [11] Фейгенбаум М. // УФН. 1983. Т. 141. В. 2. С. 343-374.

Поступило в Редакцию

8 января 1991 г.

В окончательной редакции

28 мая 1991 г.