

01;09;10

## **Синхронизация автоколебаний в распределенной системе „винтовой электронный поток — встречная электромагнитная волна,,**

© Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов

Саратовский госуниверситет им. Н.Г. Чернышевского, ГосУНЦ „Колледж“  
E-mail: aeh@cas.ssu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2002 г.

Впервые исследована синхронизация колебаний в активной распределенной системе винтовой электронный пучок, взаимодействующий со встречной волной в волноводе (мазер на циклотронном резонансе (МЦР) со встречной волной). Рассмотрены характеристики колебаний распределенной автоколебательной системы в режиме синхронизации и при выходе из него.

При взаимодействии винтового электронного пучка с ТЕ модами волновода при выполнении условия синхронизма электромагнитной и электронной волн

$$\omega \approx \hat{\omega}, \quad \hat{\omega} + \beta_0(\hat{\omega})v_{\parallel} - \omega_c = 0 \quad (1)$$

имеет место генерация высокочастотного излучения [1,2,3,4]. Здесь  $\omega_c$  — циклотронная частота,  $v_{\parallel}$  — продольная скорость электронов,  $\hat{\omega}$  — частота синхронизма. В такой системе (МЦР со встречной волной) имеет место инерционная группировка электронов, связанная с релятивистской неизхронностью электронов-осцилляторов винтового (поливинтового) пучка. Характерной особенностью МЦР на встречной волне является возможность эффективной перестройки частоты генерации в нем за счет изменения продольной скорости электронов  $v_{\parallel}$  или статического магнитного поля  $B_0$ . Вызывает большой интерес исследование различных типов внешних сигналов на такую систему. Важность рассмотрения подобной задачи обусловлена как практическими аспектами разработки гироприборов с управляемыми характеристиками, так и интересом к исследованию синхронизации автоколебаний в распределенных системах любой природы.

В данной работе с помощью численного моделирования исследована синхронизация автоколебаний внешним гармоническим сигналом в системе „винтовой электронный пучок — встречная электромагнитная волна“.

В работах [5,6] исследована динамика простой модели такой системы и показано наличие в ней различных режимов колебаний: режимов стационарной генерации, периодической и хаотической автомодуляции. Ниже приведены результаты исследования влияния внешнего гармонического сигнала на колебания в МЦР со встречной волной в режиме стационарной генерации.

Система уравнений, описывающая взаимодействие винтового пучка со встречной волной, в безразмерных переменных состоит из уравнения движения электронов слаборелятивистского винтового пучка [2] и уравнения возбуждения встречной волны электронным потоком [7]:

$$\frac{d\beta}{d\xi} - j\mu(1 - |\beta|^2)\beta = F, \quad (2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} - \frac{\partial F}{\partial \xi} = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \beta d\theta_0, \quad (3)$$

где  $\beta = r \exp(j\theta)$  — комплексный радиус траекторий электронов ансамбля, первоначально равномерно распределенных по фазе относительно ВЧ поля,  $F$  — медленно меняющаяся комплексная безразмерная амплитуда поля в сечении пучка,  $\xi$  и  $\tau$  — безразмерные продольная координата и время,  $\mu = (v_{\parallel}/c)/2\varepsilon$  — параметр неизохронности, характеризующий меру инерционности системы. Уравнения (2) и (3) решаются при следующих начальных и граничных условиях:

$$F(\tau = 0) = f^0(\xi), \quad \beta(\xi = 0) = \exp(j\theta_0), \quad \theta_0 \in [0, 2\pi]. \quad (4)$$

Внешний гармонический управляющий сигнал вводится на коллекторном конце системы и описывается как

$$F(\xi = A) = F_0 \exp(j\Omega\tau), \quad (5)$$

где  $A$  — безразмерная длина системы,  $F_0$  — амплитуда внешнего сигнала,  $\Omega$  — отстройка частоты внешнего воздействия от частоты  $\hat{\omega}$ ,

удовлетворяющей условию (1). Упрощающие предположения, положенные в основу сформулированной модели, и выражения безразмерных переменных подробно рассмотрены в работах [5,8].

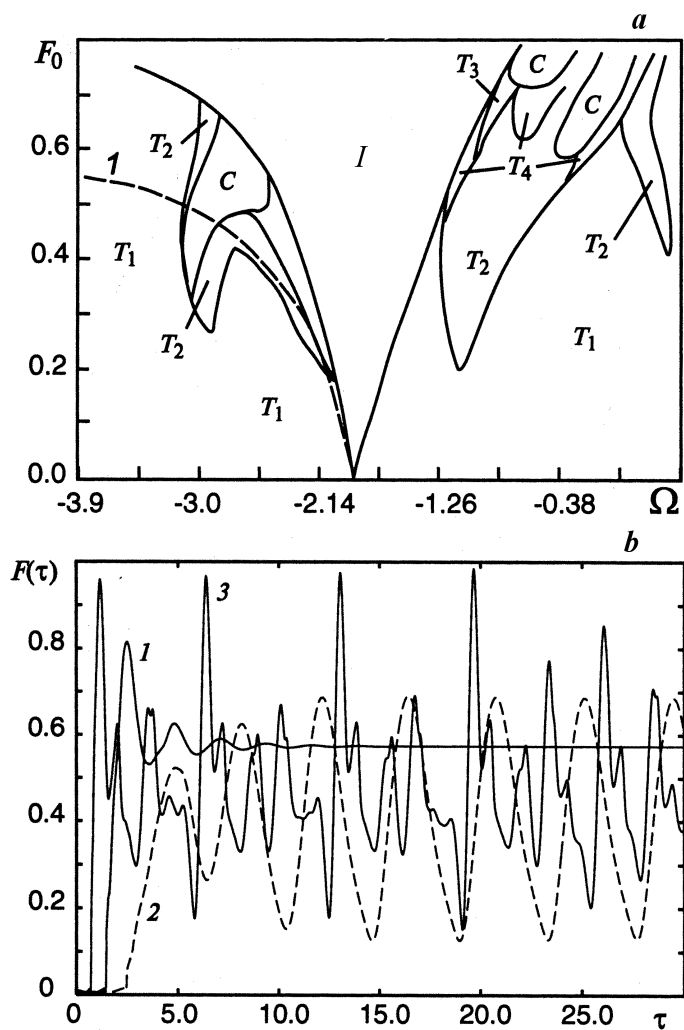
Была изучена модель МЦР со встречной волной при длине системы  $A = 3.0$  и параметре неизохронности  $\mu = 2.0$ , что соответствует режиму стационарной генерации в МЦР с частотой  $\omega_0 = -0.58\pi$  и амплитудой выходного поля  $F = 0.42$ . Коэффициент преобразования поперечной кинетической энергии в энергию поля  $\eta_{\perp} = 1 - (1/2\pi) \int_0^{2\pi} |\beta|^2 d\theta_0$  в данном режиме составляет 0.18 и близок к оптимальному [5].

На рис. 1, *a* представлено разбиение плоскости параметров амплитуда  $F_0$ –частота  $\Omega$  внешнего воздействия на характерные режимы пространственно-временных колебаний в МЦР со встречной волной.

При близости частоты внешнего воздействия  $\Omega$  к собственной частоте  $\omega_0$  стационарной генерации автономной системы в генераторе имеет место режим синхронизации (отмечен на рис. 1, *a*), в котором частота выходного сигнала  $\omega$  определяется частотой внешнего воздействия, а амплитуда выходного сигнала  $F(\xi = 0, \tau)$  после окончания переходного процесса устанавливается постоянной  $F(\xi = 0, \tau) = \text{const}$  (режим стационарной генерации). Характерная зависимость медленно меняющейся амплитуды выходного сигнала от времени  $\tau$  приведена на рис. 1, *b*, кривая 1.

Амплитудно-частотные характеристики МЦР со встречной волной, представляющие собой зависимости величины амплитуды выходного сигнала  $|F(\xi = 0)|$  от частоты  $\Omega$  в пределах области синхронизации, построенные при различных значениях амплитуды синхронизирующего сигнала  $F_0$ , приведены на рис. 2, *a*. Из него видно, что с увеличением амплитуды внешнего воздействия амплитудно-частотная характеристика генератора становится все более плоской, максимальное значение выходного сигнала в зависимости от частоты  $\Omega$  сдвигается в область больших частот. При этом при движении к границе клюва синхронизации в сторону меньших частот наблюдается более медленное спадание амплитуды стационарных синхронных колебаний.

Когда значения управляющих параметров соответствуют пересечению управляющими параметрами границы области синхронизации, имеет место переход системы в режим автомодуляции, который характеризуется тем, что амплитуда выходного сигнала генератора  $|F(\xi = 0, \tau)|$  начинает зависеть от времени (см. рис. 1, *b*, кривые 2, 3). При этом

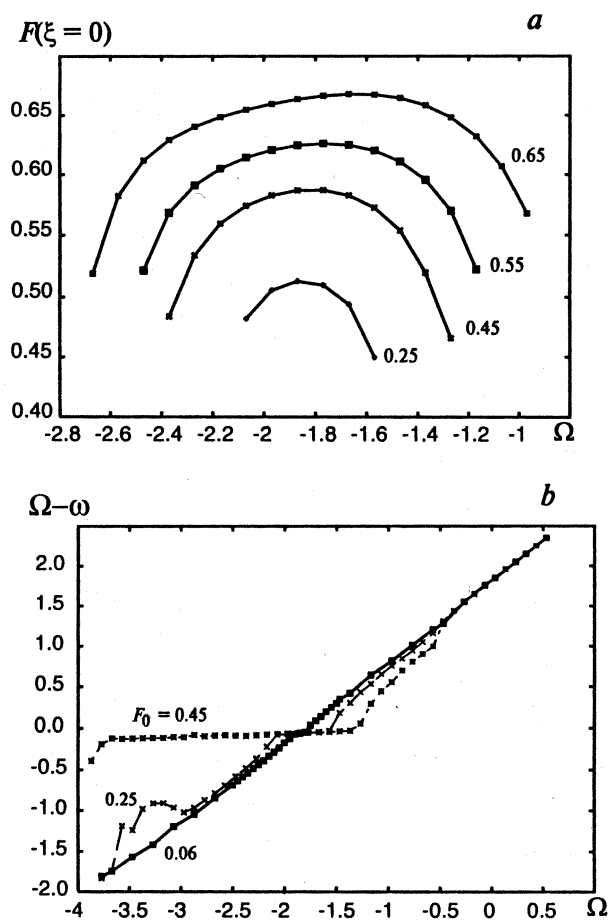


**Рис. 1.** *a)* Карта режимов на плоскости частота–амплитуда внешнего сигнала  $I$  — синхронизация; *b)* характерные временные реализации выходного сигнала  $F(\xi = 0, \tau)$  (вместе с этапом установления колебаний в системе) в различных режимах генерации ( $1$  — синхронизация (стационарная генерация),  $2$  — периодическая и  $3$  — хаотическая автомодуляция).

в зависимости от частоты и амплитуды (последняя оказывает более существенное влияние) могут возникать как режимы периодической (см. рис. 1, *b*, кривые 2), так и хаотической автомодуляции (рис. 1, *b*, кривые 3). В последнем случае амплитуда выходного сигнала ведет себя существенно нерегулярно, совершая колебания с широким сплошным спектром. На карте режимов области периодической автомодуляции обозначены символами  $T_i$ , где индекс  $i$  соответствует периоду автомодуляции (см., например, рис. 1, *b*, кривая 2, на котором представлена характерная временная реализация амплитуды выходного сигнала в режиме периодической автомодуляции), области хаотической автомодуляции — символом  $C$ .

Из рассмотрения карты режимов видно, что режимы периодической автомодуляции с единственной базовой частотой  $f_A = 1/T_A$  ( $T_A$  — период автомодуляции) возникают при небольших амплитудах внешнего воздействия  $F_0$ . С ростом  $F_0$  при определенных частотах  $\Omega$  наблюдается явление удвоения периода (режим  $T_2$ ; в секторе выходного сигнала  $|F(\tau)|$  появляется субгармоника частоты автомодуляции  $f_A$ ) и далее — появление автомодуляции с периодом 4 ( $T_4$ ; выходной сигнал содержит спектральные компоненты  $f_A, f_A/2, f_A/4$ ). Режимов автомодуляции выходного сигнала с периодом  $i > 4$ , как показало дополнительное исследование данного вопроса, не возникает.

Рассмотрим как изменяются характеристики режима автомодуляции при изменении частоты  $\Omega$  и амплитуды  $E_0$  внешнего сигнала. На рис. 2 представлены зависимости амплитуды  $F_A$  и периода  $T_A$  автомодуляции в периодическом режиме от частоты при различных значениях амплитуды  $F_0$ . При всех значениях  $F_0$  автомодуляция возникает жестко по амплитуде (см. рис. 2, *c*): на рисунке четко прослеживается скачок величины  $F_A$  при выходе из области синхронизации. Амплитуда автомодуляции растет с ростом отстройки от режима синхронизации, достигает максимального значения, а далее начинает уменьшаться. Одновременно при прохождении максимума зависимости  $F_A(\Omega)$  меняется и характер автомодуляции. При частотах, лежащих между частотой, соответствующей максимуму амплитуды автомодуляции, и частотой, соответствующей границе клюва синхронизации, то есть приблизительно для  $\Omega \in (-3.25, -2)$  и  $\Omega \in (-1.6, -0.5)$ , периодическая автомодуляция носит сложный негармонический характер. При приближении к максимуму амплитуды с уменьшением (или увеличением) частоты  $\Omega$  вид временной зависимости  $F(\xi = 0, \tau)$



**Рис. 2.** Амплитудно-частотная характеристика генератора на встречной волне (а), разность частот ( $\Omega - \omega$ ) внешнего воздействия и колебаний при различных амплитудах внешнего сигнала (б), амплитуда  $F_A$  (с) и период  $T_A$  (д) возникающей автомодуляции при выходе из клова синхронизации.

приобретает вид последовательности „импульсов“ генерации с большой амплитудой. При прохождении частотой внешнего воздействия частоты, соответствующей максимуму амплитуды автомодуляции, вид генерации

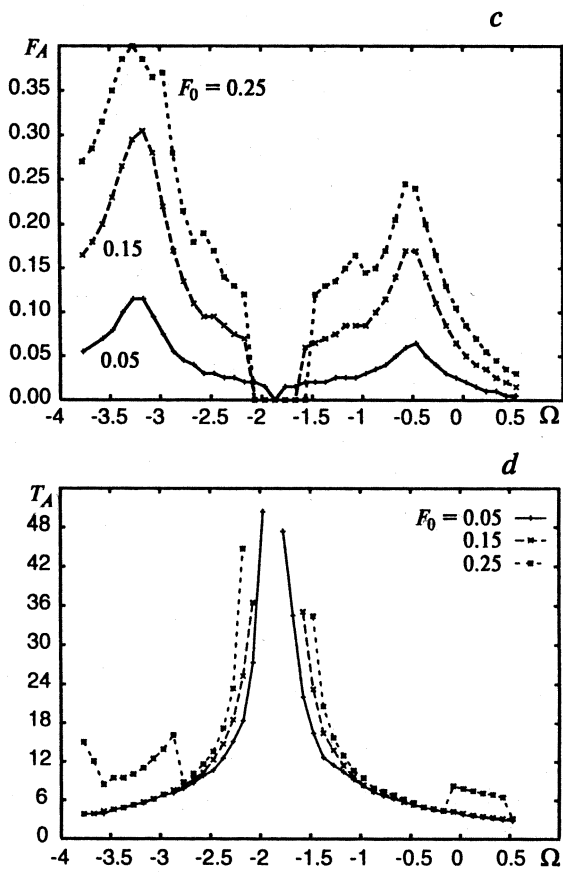


Рис. 2 (продолжение).

изменяется. Форма автомодуляции становится близкой к гармонической (см. рис. 1, b, кривая 3). Отметим также, что с ростом амплитуды внешнего воздействия амплитуда автомодуляции увеличивается. Период автомодуляции (рис. 2, d) на границе области синхронизации стремится к бесконечности и с ростом расстройки плавно уменьшается (то есть режим автомодуляции выходного сигнала генератора возбуждается мягко).

Заметим, что автомодуляция, возникающая при выходе из области синхронизации, исследуемой распределенной автоколебательной системы не является аналогом биений, которые наблюдаются при выходе из режимов синхронизации классических конечномерных автоколебательных систем (см., например, [9]).

Во-первых, частота автомодуляции  $\omega_A$  лежит достаточно далеко от комбинационных частот ( $\Omega \pm \omega$ ). Во-вторых, при исследовании явления захвата частоты  $\omega$  высокочастотной компоненты выходного сигнала  $F(\tau) \exp(j\omega t)$  внешним сигналом с частотой  $\Omega$  было обнаружено следующее явление. Область захвата частоты высокочастотного сигнала существенно больше, чем область стационарной генерации (которая отмечена на карте режимов как область синхронизации). Рис. 2, *b* иллюстрирует вышесказанное. На нем представлены зависимости разности частот ( $\Omega - \omega$ ) высокочастотных колебаний на выходе системы от частоты управляющего сигнала  $\Omega$  при различных амплитудах  $F_0$ . Из сравнения рис. 1, *a* и 2, *b* видно, что область захвата частоты со стороны больших частот (справа на рис. 1, *a*) совпадает с границей области автомодуляции (и соответственно области синхронизации), а со стороны меньших частот (справа на рис.) частота внешнего воздействия, при которой имеет место захват частоты, лежит существенно левее границы режима стационарной генерации. Граница области захвата частоты в области меньших частот нанесена на рис. 1, *a* штриховой линией (кривая *I*). Заметим, что линия *I* и граница области синхронизации не совпадают при любой сколь угодно малой амплитуде внешнего воздействия  $F_0$ .

Режим колебаний неавтономной системы, соответствующий области на карте режимов (рис. 1, *a*) между линией *I* и левой границей клюва синхронизации, можно назвать режимом квазисинхронизации. В нем ВЧ генерация системы имеет место на частоте управляющего сигнала, а ее амплитуда медленно меняется во времени с временным масштабом  $\sim T_A$ .

При большой амплитуде внешнего воздействия на карте режимов наблюдается несколько областей хаотической автомодуляции. В работе мы не останавливаемся на обсуждении режимов хаотической генерации в МЦР со встречной волной при влиянии на него внешнего гармонического сигнала. Отметим лишь, что сложная динамика исследуемой системы наблюдается вблизи окрестности границ области синхронизации.



Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 01–02–17392 00–15–96673).

## Список литературы

- [1] Гапонов А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2. № 3. С. 443.
- [2] Юлпатов В.К. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1965. № 12. С. 15.
- [3] Юлпатов В.К. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1965. № 12. С. 24.
- [4] Гиротрон Сб. научных трудов. Горький: Изд. ИПФ АН СССР, 1981.
- [5] Дмитриев А.Ю., Трубецков Д.И., Четвериков А.П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 9. С. 595.
- [6] Трубецков Д.И., Четвериков А.П. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2. № 5. С. 3.
- [7] Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. Электроника ламп с обратной волной. Саратов: Изд. Сарат. ун-та, 1975. С. 135.
- [8] Дмитриев А.Ю., Коневец А.Е., Пищик Л.А., Трубецков Д.И., Четвериков А.П. Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. Материалы 7-й зим. школы–семинара инженеров. Саратов. Изд. Сарат. ун-та, 1986. С. 61.
- [9] Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1988.