

09

## **Синхронизация колебаний распределенным внешним воздействием в гиrolампе со встречной волной**

© А.А. Короновский, А.Е. Храмов

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

*Поступило в Редакцию 10 января 2003 г.*

Впервые теоретически исследована возможность синхронизации колебаний в гиrolампе со встречной волной (гиро-ЛВВ) с помощью распределенного ввода в пространство взаимодействия управляющего сигнала. Показано, что при использовании для распределенного ввода сигнала в гиρο-ЛВВ связанных волно-ведущих систем удастся значительно увеличить ширину полосы синхронизации по сравнению с ранее изученным случаем подачи внешнего сигнала на вход пространства взаимодействия (на коллекторный конец гиρο-ЛВВ).

В настоящее время значительный интерес вызывают проблемы синхронизации распределенных автоколебательных систем сверхвысокочастотной электроники. Среди подобных задач весьма актуальной и важной является проблема синхронизации колебаний в системе „винтовой электронный пучок–электромагнитное поле“ (мазер на циклотронном резонансе) [1–5]. В работах [4–7] было проведено детальное исследование вопросов синхронизации автоколебаний в гиrolампе со встречной волной (гиро-ЛВВ) при вводе внешнего управляющего сигнала на коллекторном конце лампы и были выявлены основные закономерности процессов синхронизации и неавтономной пространственно-временной динамики активной среды, содержащей винтовой электронный пучок, для такого случая „сосредоточенного“ ввода внешнего воздействия.

Среди наиболее важных особенностей явления синхронизации в распределенных электронных системах и, в частности, в гиρο-ЛВВ следует отметить возникновение режимов квазисинхронизации, связанных с усложнением спектрального состава выходного сигнала синхронизируемого СВЧ-генератора [4,7], и усложнение пространственной динамики неавтономной распределенной системы [5,7]. Последнее проявляется

при воздействии на giro-ЛВВ управляющего гармонического сигнала с амплитудой  $F_0$  и частотой  $\Omega$  в начале пространства взаимодействия  $\xi = A$  ( $A$  — длина пространства взаимодействия giro-ЛВВ). Суть усложнения пространственной динамики заключается в следующем. В режимах синхронизации и квазисинхронизации наблюдается возникновение во всем пространстве взаимодействия режимов колебаний на частоте внешнего воздействия. Выход их режима квазисинхронизации сопровождается формированием двух характерных областей пространства взаимодействия с различной частотой колебаний поля в них. В первой пространственной области длиной  $A_s$ , примыкающей ко входу лампы  $\xi = A$  ( $A_s$  — так называемая длина синхронизации [5,7]), устанавливаются колебания на частоте  $\Omega$  внешнего воздействия. Во второй области имеют место разрушение колебаний на частоте внешнего воздействия (синхронизации) и отклонение базовой частоты  $\omega$  колебаний ВЧ поля от частоты  $\Omega$  внешнего воздействия при движении к выходу системы  $\xi = 0$ . Соответственно граница клюва квазисинхронизации отвечает условию равенства длины синхронизации общей длине пространства взаимодействия ( $A_s \equiv A$ ).

Проведенный анализ показывает, что одним из способов расширения полосы синхронизации giro-ЛВВ может стать поддержание режима синхронизации колебаний в распределенной активной среде „винтовой электронный пучок — встречная волна“, путем воздействия управляющего сигнала вдоль всей длины системы (распределенное внешнее воздействие. Подобное распределенное воздействие можно реализовать за счет применения распределенного ввода сигнала с помощью связанных волноведущих систем (СВС).

Gиро-ЛВВ СВС была подробно изучена в работах [8], в них были получены рабочие уравнения, описывающие процессы в подобной системе (см. также работы, в которых анализируются приборы с длительным взаимодействием  $O$ -типа и связанными волноведущими структурами [9,10]). Рабочие уравнения, описывающие динамику неавтономной giro-ЛВВ СВС, включают в себя уравнения возбуждения каждой из волноведущих систем и уравнение движения электронов-осцилляторов винтового пучка и записываются как

$$\frac{\partial F_1}{\partial \tau} - \frac{\partial F_1}{\partial \xi} - j\alpha F_2 = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \beta d\theta_0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \tau} - \frac{\partial F_2}{\partial \xi} - j\alpha F_1 = 0, \quad (2)$$

$$d\beta/d\xi - j\mu(1 - |\beta|^2)\beta = F_1, \quad (3)$$

$$F_1(\xi = A) = 0, \quad F_2(\xi = A) = F_3, \quad \beta(\xi = 0) = \exp(j\theta_0), \quad \theta_0 \in [0, 2\pi], \quad (4)$$

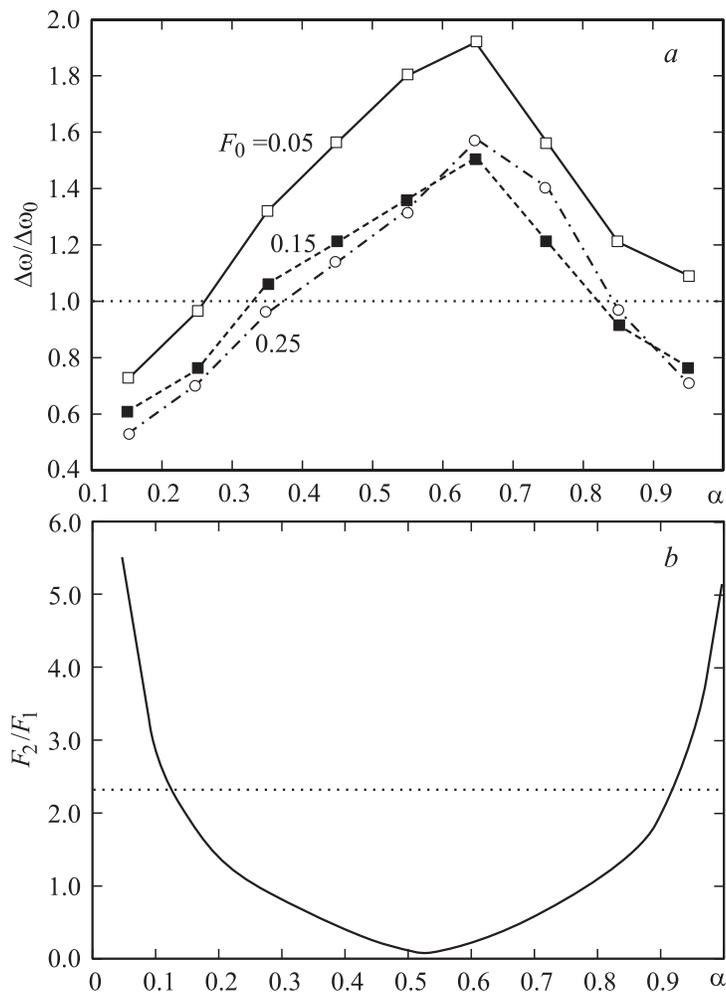
где предполагается, что винтовой пучок пропускается через первую из волноведущих систем. Начальные условия (4) определяют, что внешний синхронизирующий сигнал  $F_3 = F_0 \exp[j\Omega\tau]$  подается на вход  $\xi = A$  второй из связанных волноведущих систем.

В уравнениях (1)–(4) введены следующие обозначения  $F_{1,2}$  — величины, пропорциональные амплитудам ВЧ полей соответственно в каждой из СВС,  $\alpha$  — коэффициент связи между СВС [8],  $\beta = r \exp(j\theta)$  — комплексный радиус траекторий электронов винтового пучка,  $\mu$  — параметр неизохронности электронов-осцилляторов [11,12],  $\xi$  и  $\tau$  — безразмерные продольная координата и время. Упрощающие предположения, положенные в основу сформулированной модели, и выражения для безразмерных переменных подробно рассмотрены в работах [8,12].

Будем исследовать синхронизацию giro-ЛВВ распределенным воздействием при тех же значениях управляющих параметров, что и в работах [4,7], в которых анализировалась синхронизация giro-ЛВВ сигналом, вводимым на коллекторном конце лампы, а именно  $\mu = 2.0$  и  $A = 3.0$ .

На рис. 1, а показаны зависимости нормированной ширины полосы синхронизации  $\Delta\omega/\Delta\omega_0$  giro-ЛВВ с распределенным вводом высокочастотного управляющего сигнала от коэффициента связи  $\alpha$  между волноведущими системами, построенные для различных амплитуд внешнего воздействия  $F_0$ . Нормировка ширины полосы синхронизации  $\delta\omega$  осуществлялась на величину ширины полосы квазисинхронизации  $\Delta\omega_0$  при воздействии на giro-ЛВВ сигналом, подаваемым на коллекторный конец лампы и имеющим такую же амплитуду  $F_0$  (см. работы [4,5,7]).

Из рисунка следует, что при распределенном воздействии синхронизирующего сигнала на giro-ЛВВ ширина полосы синхронизации  $\Delta\omega$  (т.е. захвата базовой частоты генерации гиролампы внешним сигналом) существенно расширяется в некотором диапазоне значений коэффициента связи  $\alpha$  связанных волноведущих структур, через которые внешний сигнал воздействует на активную среду „винтовой электронный пучок“. При малых амплитудах внешнего воздействия



**Рис. 1.** *a* — зависимости нормированной ширины полосы синхронизации  $\Delta\omega/\Delta\omega_0$  гиро-ЛВВ с распределенным вводом высокочастотного управляющего сигнала от коэффициента связи  $\alpha$  между волноведущими системами, построенные для различных амплитуд внешнего воздействия  $F_0$ ; *b* — зависимость отношения  $F_2/F_1$  на выходе связанных волноведущих систем без электронного пучка от величины  $\alpha$ .

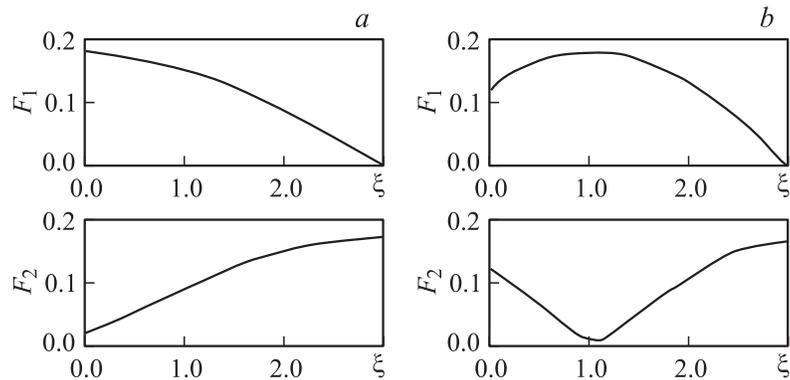
(см. рис. 1,  $a$ ;  $F_0 = 0.05$ ) расширение полосы синхронизации  $\Delta\omega > \Delta\omega_0$  имеет место в диапазоне коэффициентов связи  $\alpha > 0.25$ . С ростом мощности внешнего синхронизирующего сигнала область по параметру  $\alpha$ , в которой наблюдается увеличение ширины полосы синхронизации, уменьшается ( $\alpha \in (0.35, 0.8)$ ). Одновременно с ростом  $F_0$  наблюдается уменьшение нормированной ширины полосы  $\Delta\omega/\Delta\omega_0$ .

Расширение полосы синхронизации в случае распределенного ввода энергии внешнего сигнала определяется особенностями физических процессов в неавтономной giro-ЛВВ.

При „сосредоточенном“ воздействии синхронизирующего сигнала на коллекторном конце лампы внешнее поле воздействует уже на хорошо сгруппированный электронный пучок. При распределенном введении внешнего синхронизирующего поля внешнее воздействие оказывается на винтовой пучок на всей длине системы. Поэтому в последнем случае существует возможность эффективной модуляции винтового пучка на частоте внешнего сигнала вблизи пушечного конца лампы, где пучок еще слабо сгруппирован. Тогда в винтовом пучке, который группируется благодаря фазовой модуляции ансамбля электронов-осцилляторов, имеет место более интенсивный рост к коллекторному концу лампы гармоники сгруппированного тока, частота которой равна частоте  $\Omega$  внешнего поля, чем в случае подачи управляющего сигнала такой же мощности в начале пространства взаимодействия  $\xi = A$ . В результате при распределенном воздействии синхронизирующего поля длина синхронизации  $A_s$  увеличивается и оказывается равной длине пространства взаимодействия  $A$  в частотном диапазоне  $\Delta\omega$ , большем, чем ширина полосы синхронизации  $\Delta\omega_0$  в случае „сосредоточенного“ воздействия на систему.

Таким образом, ширина полосы синхронизации при использовании распределенного ввода внешнего сигнала при оптимальных коэффициентах связи между СВС существенно возрастает.

Наиболее оптимальным при рассматриваемой длине  $A = 3.0$  пространства взаимодействия оказывается коэффициент связи  $\alpha \approx 0.65$ , при котором ширина полосы синхронизации относительно случая „сосредоточенного“ воздействия на giro-ЛВВ (подаче сигнала на коллекторном конце) увеличивается в  $1.5 \div 2$  раза. Оптимальный коэффициент связи  $\alpha$  определяется особенностями перераспределения ВЧ мощности, подаваемой на вход одной из СВС, между каждой из волноведущих систем.



**Рис. 2.** Распределение амплитуд ВЧ полей в каждой из „холодных“ связанных волноведущих систем вдоль пространства взаимодействия при коэффициенте связи  $\alpha = 0.5$  (a) и  $\alpha = 0.8$  (b). Внешнее поле с частотой, равной частоте автономной генерации gyro-ЛВВ, подается на вход  $\xi = A = 3.0$  второй волноведущей структуры.

На рис. 1, b представлена зависимость отношения  $F_2/F_1$  на выходе системы  $\xi = 0$  величин амплитуд полей в „холодных“ волноведущих системах (без электронного пучка) от коэффициента связи  $\alpha$ . Внешнее поле амплитуды  $F_0$  и с частотой, равной частоте автономной генерации gyro-ЛВВ, подается на вход второй из волноведущих систем:  $F_1(\xi = A) = 0$  и  $F_2(\xi = A) = F_0$ . Видно, что при малых  $\alpha$  из второй структуры в первую „перекачивается“ только часть ВЧ мощности. Это соответствует тому, что при использовании СВС с таким коэффициентом связи  $\alpha$  для синхронизации gyro-ЛВВ эффективная мощность поля, воздействующего на электронный пучок, уменьшается за счет неполной „перекачки“ в пространство взаимодействия гиролампы.

При  $\alpha \sim 0.4 \div 0.7$  наблюдается практически полное ответвление мощности из одной волноведущей структуры в другую. Это иллюстрирует рис. 2, a, на котором представлены распределения полей в каждой из „холодных“ СВС вдоль пространства взаимодействия, построенные при коэффициенте связи  $\alpha = 0.5$ . Видно, что практически вся ВЧ мощность, поданная на вход второй волноведущей структуры, ответвилась в первую структуру, и амплитуды полей на выходе каждой их СВС следующие:  $F_1(\xi = 0) \approx F_0$  и  $F_2(\xi = 0) \approx 0$ . В этом случае ширина

полосы синхронизации максимальна: на винтовой пучок воздействует вся мощность внешнего синхронизирующего сигнала по всей длине пространства взаимодействия.

При больших коэффициентах связи  $\alpha > 0.6$  имеет место обратная перекачка ВЧ мощности из первой СВС во вторую, в результате амплитуда поля на выходе второй СВС начинает расти (рис. 1, *b*). Из рис. 2, *b* ( $\alpha = 0.8$ ) видно, что практически полная „перекачка“ мощности ВЧ поля в первую СВС произошла на длине системы  $\xi = (2/3)A$ , а далее начинается обратный процесс. Последнее эквивалентно тому, что эффективная длина, на которой внешнее поле воздействует на электронный пучок, в пространстве взаимодействия уменьшается (в случае  $\alpha = 0.8$  уменьшение составляет величину  $(1/3)A$ ). В результате наблюдается уменьшение ширины полосы синхронизации генератора. При значительных коэффициентах связи  $\alpha > 0.9 \div 1.1$ , когда длина, на которой происходит „перекачка“ ВЧ мощности из одной СВС в другую, составляет малую часть пространства взаимодействия, ширина полосы синхронизации резко сокращается, становясь меньше соответствующей величины  $\Delta\omega_0$  для сосредоточенного ввода внешнего сигнала.

В заключение заметим, что при распределенном воздействии внешнего сигнала в режиме синхронизации имеет место увеличение к.п.д. генерации гиро-ЛВВ. Так, при оптимальном коэффициенте связи  $\alpha = 0.65$  к.п.д. генерации  $\eta$  составил 23.2%, тогда как в автономном режиме генерации  $\eta = 18.7\%$ .

Работа поддержана РФФИ (проекты 02-02-16351 и 01-02-17392).

## Список литературы

- [1] Kou C.S., Chen S.H., Barnett L.R., Chen H.Y., Chu K.R. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. N 7. P. 924.
- [2] McCurdy A.H. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. N 14. P. 1845.
- [3] Felch K.L., Danly B.G., Jory H.R., Kreischer K.E., Lawsom W., Levush B., Temkin R.J. // Proceedings of the IEEE. 1999. V. 87. N 5. P. 752.
- [4] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 18. С. 34.
- [5] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. № 12. С. 1761.
- [6] Короновский А.А., Ремпен И.С., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. № 12. С. 1754.
- [7] Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. XLV. № 9. С. 773.

- [8] *Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 4. С. 63; *Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 6. С. 110–117.
- [9] *Льюиселл У.* Связанные и параметрические колебания в электронике. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.
- [10] *Трубецков Д.И.* // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 3-я зимняя школа-семинар инженер. Кн. 5. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. С. 89.
- [11] *Дмитриев А.Ю., Трубецков Д.И., Четвериков А.П.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 9. С. 595.
- [12] *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. Кн. 3. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1986. С. 61.