

09

## **Исследование возникновения автомодуляции в гирогенераторе со встречной волной и внешней обратной связью**

© М.В. Белоглазкина, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: aeh@cas.ssu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 11 января 2006 г.

Проведено исследование возникновения многочастотных режимов колебаний в системе „винтовой электронный пучок — встречная электромагнитная волна“ (гиро-ЛВВ) с внешней обратной связью. Показано, что пороги самовозбуждения и возникновения многочастотных колебаний в гири-ЛВВ существенно зависят от параметров обратной связи и определяются добротностью и частотами собственных колебаний резонатора, образованного электродинамической системой гири-ЛВВ и цепью запаздывающей обратной связи.

PACS: 84.30.Ng

Одним из важных и перспективных приборов современной электроники больших мощностей является гирогенератор со встречной волной (гири-ЛВВ), который активно исследуется в последнее время как источник мощного СВЧ-излучения (до десятков MW) в миллиметровом диапазоне длин волн [1–4]. К недостаткам гирогенератора со встречной волной следует отнести характерные для него многочастотные режимы генерации, которые возникают с увеличением тока винтового электрон-

ного пучка или длины пространства взаимодействия пучка со встречной волной [4].

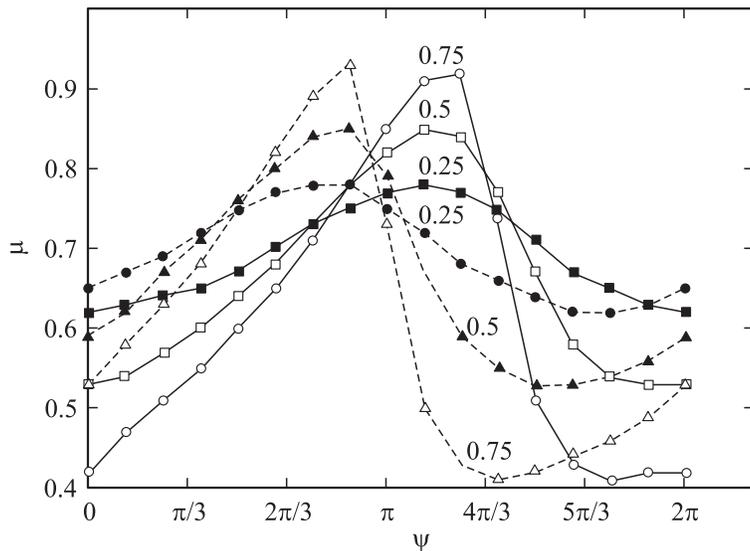
Поэтому представляется весьма важным провести исследование причин возникновения многочастотных режимов генерации (в том числе и хаотических режимов колебаний) в различных модификациях giro-ЛВВ. Так, в наших работах [5,6] в качестве перспективного генератора с винтовым электронным пучком была рассмотрена система со связанными электродинамическими системами, в которой при определенных условиях наблюдается подавление возникновения многочастотных колебаний с ростом тока пучка. В работе [7] исследуется подавление автомодуляции выходного сигнала giro-ЛВВ за счет воздействия на систему внешнего гармонического сигнала. В представленной работе проводится исследование возникновения автомодуляции (как периодической, так и хаотической) в giroгенераторе со встречной волной с внешней запаздывающей обратной связью (ОС). Отметим, что в работах [8–12] были проведены теоретические и экспериментальные исследования нестационарной динамики в лампе обратной волны с отражениями от концов замедляющей системы (резонансная ЛОВ), что также можно интерпретировать как систему с цепью ОС.

Нестационарная нелинейная самосогласованная система уравнений, описывающая взаимодействие винтового электронного потока со встречной волной в giro-ЛВВ, состоит из уравнения движения электронов слабoreлятивистского винтового пучка и уравнения возбуждения встречной волны электронным потоком, которые в безразмерном виде записываются как [4, гл. 1 (16)]:

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

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;  $\mu$  — параметр неизохронности электронов-осцилляторов [13], связанный с релятивистской зависимостью массы электронов от энергии и определяющий меру инерционности системы.

Введение внешней обратной связи определялось подачей части мощности с выхода (пушечного конца  $\xi = 0$ ) на вход (коллекторный



**Рис. 1.** Зависимости величины параметра неизохронности  $\mu$ , при котором наблюдается самовозбуждение giro-ЛВВ, от фазы  $\psi$  коэффициента ОС для различных значений амплитуды  $k$  (отмечены цифрами около соответствующих кривых) и двух величин времени запаздывания ОС:  $T = 0.5$  (сплошные линии) и  $T = 1.0$  (штриховые линии).

конец  $\xi = A$ ) giro-ЛВВ и в математической модели (1) описывалось как

$$F(x = A, \tau) = KF(x = 0, \tau - T), \quad (2)$$

где  $A = 3.0$  — безразмерная длина пространства взаимодействия,  $K = k \exp[j\psi]$  — комплексный коэффициент обратной связи ( $k$  — амплитуда и  $\psi$  — фаза коэффициента обратной связи),  $T$  — запаздывание в цепи ОС. Как показано в работах [11, 12, 14], аналогичное выражение (2) при ряде упрощающих предположений описывает наличие в ЛОВ отражений электромагнитной волны от концов электродинамической системы.

Рассмотрим влияние ОС на пусковые условия giro-ЛВВ. На рис. 1 показаны зависимости величины параметра неизохронности  $\mu_s$ , при котором наблюдаются самовозбуждение лампы и установление режима

стационарной генерации, от фазы  $\psi$  коэффициента ОС для различных значений амплитуды  $k$  и запаздывания  $T$  ОС. В силу того, что зависимость от параметра  $\psi$  является периодической, достаточно рассмотреть только диапазон  $\psi \in [0, 2\pi)$ . Отметим, что при отсутствии внешней ОС пусковая величина параметра неизохронности  $\mu_s = 0.67$ .

Из рисунка видно, что изменение фазы коэффициента ОС оказывает существенное влияние на порог самовозбуждения giro-ЛВВ с ОС. Так, при некоторых значениях фазы  $\psi_{\min}$  порог самовозбуждения резко уменьшается, при других фазах  $\psi_{\max}$ , наоборот, наблюдается увеличение порога самовозбуждения лампы. При этом величина увеличения (или уменьшения) порога самовозбуждения тем больше, чем больше величина амплитуды  $k$  коэффициента ОС.

Рассмотрим, с чем связано такое поведение порога самовозбуждения giro-ЛВВ с ОС. Отрезок электродинамической системы giro-ЛВВ с цепью внешней ОС может быть рассмотрен как резонансная система. Несложно показать, что комплексная передаточная характеристика такой резонансной системы может быть записана в следующем виде:

$$G(\omega) = 1 / \sqrt{1 - k \exp[-j(T + 1) - \psi]}, \quad (3)$$

откуда несложно найти резонансные частоты  $\omega_s$  собственных мод резонатора:

$$\omega_s = \frac{2\pi s + \psi}{1 + T}, \quad s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

Таким образом, спектр собственных частот является эквидистантным. Отметим также, что из уравнения (3) следует, что добротность собственных мод возрастает с ростом амплитуды  $k$  коэффициента ОС.

Известно [4,15], что мощность взаимодействия  $P_e$  винтового пучка со встречной электромагнитной волной в линейном приближении определяется соотношением

$$P_e(\omega) = \kappa \{ \Phi(\omega) + \mu A \Theta(\omega) \}, \quad (5)$$

где  $\Phi(\omega)$  и  $\Theta(\omega)$  — функции, описывающие процессы линейной ( $M$ -типа) и квадратичной ( $O$ -типа) группировок соответственно [16];  $\kappa$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от длины системы.

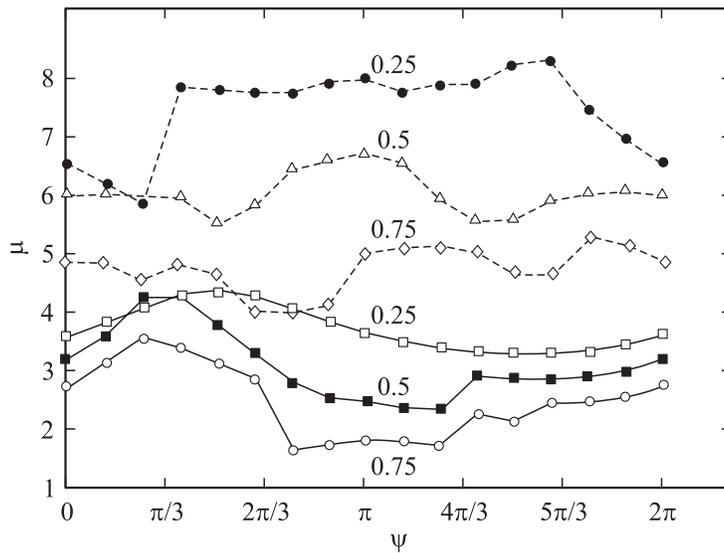
Усиление и самовозбуждение giro-ЛВВ наблюдается в диапазоне частот  $\Delta\omega_a$ , в котором активная мощность взаимодействия  $P_{ea}(\omega) =$

$= \operatorname{Re} P_e(\omega) < 0$ . Из соотношений (3) и (4) следует, что, изменяя параметры ОС (фазу и длительность задержки), можно управлять попаданием резонансных частот резонатора „электродинамическая система giro-ЛВВ — цепь ОС“ в полосу частот  $\Delta\omega_a$ , соответствующую частотам самовозбуждения giro-ЛВВ. Очевидно, что при близости собственной частоты резонансной системы к частоте, соответствующей максимуму активной мощности взаимодействия (5) гирогенератора, самовозбуждение облегчается и пусковое значение  $\mu_s$  уменьшается. При  $T = 0.5$  такая ситуация складывается при фазе ОС  $\psi/\pi \in (5/3, 2)$  (см. рис. 1). При изменении фазы  $\psi$  ОС резонансные частоты изменяются и выходят из полосы частот  $\Delta\omega_a$ , так что самовозбуждение лампы происходит при больших значениях параметра неизохронности  $\mu_s$  (рис. 1). Для  $T = 0.5$  случай  $\psi/\pi \approx 4/3$ , при котором значение  $\mu_s$  максимально, соответствует ситуации, когда в полосу усиления  $\Delta\omega_a$  не попадает ни одной собственной частоты  $\omega_s$  резонансной системы.

Из анализа соотношения (4) также следует, что изменение длительности задержки  $T$  в цепи ОС не должно оказывать существенного влияния на вид зависимости порога самовозбуждения giro-ЛВВ от фазы  $\psi$  коэффициента ОС, сдвигая ее на некоторую величину, определяемую запаздыванием  $T$ . Последнее также иллюстрируют численные результаты на рис. 1 (ср. зависимости параметра неизохронности  $\mu_s$ , при котором возникает генерация в giro-ЛВВ, соответствующая различным временам запаздывания  $T = 0.5$  и  $T = 1$ ).

Рассмотрим теперь кратко, как влияют параметры внешней ОС на возникновение многочастотных автомодуляционных колебаний в giro-ЛВВ. На рис. 2 показаны границы возникновения периодической и хаотической автомодуляции giro-ЛВВ от фазы  $\psi$  для различных величин  $k$  коэффициента ОС. Видно, что с увеличением коэффициента  $k$  величина параметра неизохронности, при которой происходит переход к автомодуляции (как периодической, так и хаотической), уменьшается, что объясняется увеличением добротности системы.

Из сравнения рис. 1 и 2 можно видеть, что при значениях фазы  $\psi$ , когда самовозбуждение происходит при больших параметрах неизохронности, возникновение автомодуляции происходит при меньших величинах  $\mu$ , т. е. в тех областях, где порог  $\mu_s$  самовозбуждения giro-ЛВВ увеличивается, порог автомодуляции  $\mu_a$  снижается. Это связано с тем, что в этом случае резонансные частоты собственных мод резонатора лежат далеко от частоты максимального усиления, на которой и



**Рис. 2.** Зависимости величин параметра неизохронности  $\mu$ , при котором возникают периодическая (сплошная линия) и хаотическая (штриховая линия) автомодуляции giro-ЛВВ, от фазы  $\psi$  коэффициента ОС для различных значений амплитуды  $k$  (отмечены цифрами около соответствующих кривых). Время запаздывания ОС  $T = 0.5$ .

возникает генерация в giro-ЛВВ. Однако с ростом параметра  $\mu$  и возникновением автомодуляции частота автомодуляционных компонент в спектре колебаний оказывается близкой к одной из собственных частот резонатора. В результате порог возникновения режима автомодуляции уменьшается, притом тем сильнее, чем больше добротность резонатора (больше величина  $k$ ). Наоборот, если собственная частота  $\omega_s$  лежит вблизи частоты генерации giro-ЛВВ, то порог самовозбуждения лампы снижается, но частоты автомодуляционных компонент с ростом  $\mu$  возникают вдали от собственных частот резонатора, так что порог возникновения автомодуляции растёт.

Работа поддержана РФФИ (грант № 06-02-81013), Программой поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-4167.2006.2). А.Е. Храмов благодарит за финансовую поддержку CRDF (грант Y2-P-06-06).

## Список литературы

- [1] *Felch K.L., Danly B.G., Jory H.R.* et al. // Proc. IEEE. 1999. V. 87. N 5. P. 752.
- [2] *Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Antonsen T.M.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. N 21. P. 218301–1.
- [3] *Grudiev A., Schünemann K.* // Phys. Rev. E. 2003. V. 68. P. 016501.
- [4] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
- [5] *Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 6. С. 110–117.
- [6] *Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 4. С. 63–70.
- [7] *Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 6. С. 1–8.
- [8] *Амиров Р.Ш., Безручко Б.П., Исаев В.А., Четвериков А.П.* // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (6-я зимняя школа-семинар инженеров). Кн. 2. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. С. 90–105.
- [9] *Астахов С.А., Безручко Б.П., Зборовский А.В., Трубецков Д.И.* // Матер. Междунар. науч.-техн. конференции „Актуальные проблемы электронного машиностроения“. Саратов: СГТУ, 1998. Т. 1. С. 39–42.
- [10] *Levush V., Antonsen T.M., Bromborsky A., Lou W.R., Carmel Y.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1992. V. 20. N 3. P. 263.
- [11] *Титов В.Н.* Дис. . . . к.ф.-м.наук. Саратовский гос. ун-т, 2000.
- [12] *Трубецков Д.И., Ремпен И.С., Рыскин Н.М., Титов В.Н., Храмов А.Е.* // Радиотехника. 2003. Т. 67. № 2. С. 36–44.
- [13] *Юлпатов В.К.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1965. № 12. С. 15.
- [14] *Бондаренко В.А., Островский А.О., Ткач Ю.В.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 6. С. 134–137.
- [15] *Дмитриев А.Ю., Коневец А.Е., Пищик Л.А., Трубецков Д.И., Четвериков А.П.* // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 7-я зимняя школа-семинар. Кн. 1. Саратов, 1981. С. 61.
- [16] *Шевчик В.Н., Трубецков Д.И.* Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Сов. радио, 1970.