

09;10

О возможности увеличения порога автомодуляции в гирогенераторе со встречной волной и связанными электродинамическими системами

© А.А. Короновский, А.Е. Храмов

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

Поступило в Редакцию 29 июля 2002 г.

Исследуется возможность увеличения порога возникновения автомодуляции с увеличением тока пучка в гирогенераторе со встречной волной путем применения связанных волноводных систем. Показано, что в такой системе возможно значительно отодвинуть по току границу области автомодуляции и получить большую мощность в одночастотном режиме генерации.

В последнее время большое внимание привлекают вопросы генерации и усиления высокочастотного электромагнитного излучения при взаимодействии винтовых электронных потоков с бегущими волнами [1–7]. При взаимодействии потока со встречной волной (гиrolампа со встречной волной (гиро-ЛВВ)) имеется возможность получить генерацию с легко перестраиваемой частотой излучения за счет изменения продольной скорости электронов или статического магнитного поля [1,8]. Однако гиrolампа имеет сравнительно низкий к.п.д., максимальное значение которого порядка 20% [7]. Это связано с особенностями взаимодействия электронов-осцилляторов пучка с ВЧ полем вдоль пространства взаимодействия: ВЧ мощность распространяется навстречу пучку и электроны-осцилляторы группируются в сильном выходном поле. Быстро сгруппировавшись, пучок также быстро разгруппировывается, не успев отдать полю свою энергию. Далее происходит образование вторичного фазового сгустка на длине системы. В результате характерными для гиrolампы оказываются многогорбые распределения тока и поля, которые обусловлены многократной перегруппировкой пучка. Как следствие, с увеличением длины системы

или тока пучка в gyro-LVBV быстро возникает автомодуляция выходного сигнала — спектр генерации становится многочастотным [5,7,9]. Для повышения к.п.д. и выходной мощности (которая определяется увеличением рабочего тока пучка) с сохранением одночастотной генерации необходимо так изменить распределение поля вдоль длины системы, чтобы вблизи выхода поле было мало, а в области коллектора оно имело один максимум, где сформировавшийся фазовый сгусток электронов отдавал бы по полю значительную долю своей энергии. Одним из путей решения данной задачи может быть использование распределенного отбора мощности путем применения идентичных связанных волноведущих систем (СВС), через одну из которых проходит винтовой электронный пучок [10].

В данной работе анализируется возможность расширения области одночастотной генерации в gyro-LVBV СВС.

Нестационарная система уравнений, описывающая динамику gyro-LVBV СВС, имеет следующий вид. Для амплитуд полей двух слабосвязанных волноведущих систем, через одну из которых (для определенности — первую) движется винтовой электронный пучок, можно записать (см., например, [7,9]):

$$\frac{\partial F_1}{\partial \tau} - \frac{\partial F_1}{\partial \xi} - \alpha_1 F_2 = -I_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \tau} - \frac{\partial F_2}{\partial \xi} - \alpha_2 F_1 = 0, \quad (2)$$

где $F_{1,2}$ — медленно меняющиеся комплексные безразмерные амплитуды полей соответственно в первой и второй электродинамической структуре, ξ и τ — безразмерные продольная координата и время, $\alpha_{1,2}$ — параметры связи. Вследствие идентичности систем $|\alpha_1| = |\alpha_2| = \hat{\alpha}$, а из закона сохранения потока мощности при $I_1 = 0$ следует, что $\alpha_1 = -\alpha_2^* = j\hat{\alpha}$.

Амплитуда ВЧ тока пучка I_1 , пропускаемого через одну из электродинамических структур, определяется как $I_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \beta d\theta_0$, где $\beta = r \exp(j\theta)$ — комплексный радиус траекторий электронов винтового пучка, определяемый из уравнения движения [7]:

$$\frac{d\beta}{d\xi} - j\mu(1 - |\beta|^2)\beta = F_1. \quad (3)$$

Здесь μ — параметр неизохронности электронов-осцилляторов [7,11]. Уравнения (1)–(3) решаются при следующих начальных и граничных условиях:

$$\begin{aligned} F(\xi = A) &= 0, & F(\tau = 0) &= f^0(\xi), \\ \beta(\xi = 0) &= \exp(j\theta_0), & \theta_0 &\in [0, 2\pi], \end{aligned} \quad (4)$$

где A — безразмерная длина системы. Упрощающие предположения, положенные в основу сформулированной модели, и выражения для безразмерных переменных подробно рассмотрены в работах [7,11].

Управляющими параметрами модели являются длина системы A , параметр неизохронности μ и коэффициент связи $\hat{\alpha}$. Если рассматривается система с постоянным током пучка I_0 , то при постоянном μ изменение A соответствует изменению длины системы l . При неизменной длине l при изменении A за счет изменения тока I_0 постоянное значение сохраняет параметр μA .

Рассмотрим пусковые условия giro-ЛВВ СВС. На рис. 1, *a* показаны зависимости величины параметра неизохронности μ , при котором наблюдается самовозбуждение лампы и установление режима стационарной генерации, от коэффициента связи $\hat{\alpha}$ для трех значений длины A . Параметр неизохронности μ нормировался на величину μ_0 , соответствующую возбуждению лампы при $\hat{\alpha} = 0$. Из рисунка видно, что при введении связи между электродинамическими системами величина параметра неизохронности μ , при котором возникает самовозбуждение, растет по сравнению со случаем $\hat{\alpha} = 0$. При этом зависимости $\mu(\hat{\alpha})$ имеют вид кривых с одним максимумом. С увеличением длины системы A относительное увеличение „пускового“ значения параметра неизохронности $\mu(\hat{\alpha})/\mu_0$ становится меньше: соответствующие кривые при больших коэффициентах связи располагаются на графике тем ниже, чем больше длина A .

Рассмотрим, с чем связано такое поведение в пусковом режиме giro-ЛВВ СВС. Систему уравнений (1)–(3) можно переписать в форме связанных волн

$$\frac{\partial F_S}{\partial \tau} - \frac{\partial F_S}{\partial \xi} = -I_1 \exp[j\hat{\alpha}\xi], \quad (5)$$

$$\frac{\partial F_F}{\partial \tau} - \frac{\partial F_F}{\partial \xi} = -I_1 \exp[-j\hat{\alpha}\xi], \quad (6)$$

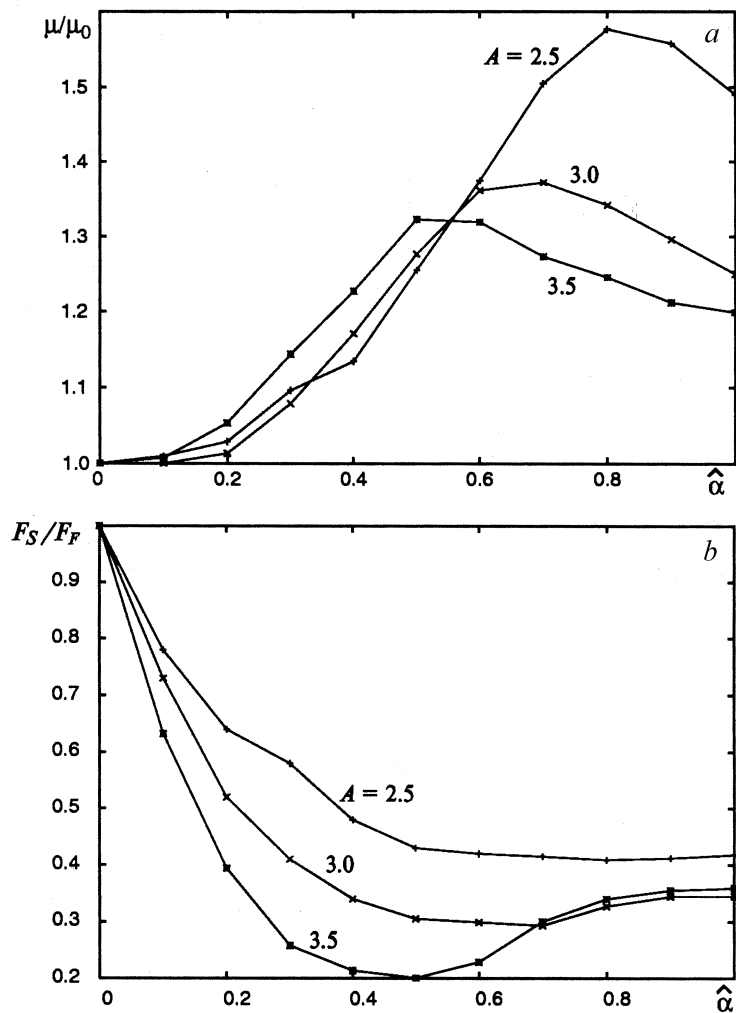


Рис. 1. Зависимости величины параметра неизохронности μ (*a*), при котором наблюдается самовозбуждение лампы, и зависимости отношения амплитуд медленной и быстрой нормальных волн F_S/F_F на выходе системы вблизи границы самовозбуждения $\mu(\hat{\alpha})$ (*b*) от коэффициента связи $\hat{\alpha}$ для различных значений параметра A .

$$\frac{d\beta}{d\xi} - j\mu(1 - |\beta|^2)\beta = \frac{1}{2}(F_S \exp[-j\hat{\alpha}\xi] - F_F \exp[j\hat{\alpha}\xi]), \quad (7)$$

где $F_S = F_1 + F_2$ — амплитуда „медленной“ нормальной волны (ее постоянная распространения $\beta_S = \beta_0 + \hat{\alpha}$; β_0 — постоянная распространения встречной волны на частоте „холодного“ синхронизма) и $F_F = F_2 - F_1$ — амплитуда „быстрой“ ($\beta_F = \beta_0 - \hat{\alpha}$) нормальной волны связанной системы.

На рис. 1, *b* представлены зависимости отношения амплитуд медленной и быстрой нормальных волн F_S/F_F на выходе системы $\xi = 0$ вблизи границы самовозбуждения лампы от коэффициента связи $\hat{\alpha}$ для различных длин пространства взаимодействия A . Сравнивая рис. 1, *b* с рис. 1, *a* можно сделать вывод, что максимальное увеличение пускового значения параметра неизохронности соответствует минимальным значениям величины F_S/F_F . Последнее означает, что с ростом коэффициента связи имеет место преимущественное возбуждение быстрой волны в связанных электродинамических системах, т.е. пучок взаимодействует селективно с нормальными волнами. Сопротивление связи каждой из нормальных волн в два раза меньше, чем сопротивление связи gyro-ЛВВ с одной электродинамической системой (т.е. при $\hat{\alpha} = 0$). Поэтому для самовозбуждения gyro-ЛВВ СВС необходимо увеличение тока пучка по сравнению с gyro-ЛВВ при $\hat{\alpha} = 0$. Это означает, что при фиксированной длине системы A для возбуждения лампы необходимо увеличение величины параметра неизохронности μ электронов-осцилляторов.

Исследуем теперь границу области автомодуляции выходного сигнала gyro-ЛВВ СВС. На рис. 2, *a* представлены зависимости величины параметра неизохронности μ_{aut} , при котором наблюдается возникновение автомодуляции, от коэффициента связи $\hat{\alpha}$ для различных длин пространства взаимодействия A . Как следует из представленных данных, значения μ_{aut} значительно увеличиваются при введении связи. Максимальное увеличение наблюдается при $\hat{\alpha} \approx 1.0$, которое по абсолютной величине тем больше, чем меньше длина пространства взаимодействия A . При этом максимальное относительное увеличение примерно одинаково для разных длин A , так при $A = 2.5$ $\mu_{aut}/\mu_{aut}(\hat{\alpha} = 0) \approx 2.52$, при $A = 3.0$ — 2.77; при $A = 3.5$ — 2.76.

Заметим также, что в gyro-ЛВВ СВС сменяется характер возникновения режима автомодуляции. Если при $\hat{\alpha} = 0$ автомодуляция возникала жестким образом, т.е. при $\mu = \mu_{aut}$ ($\hat{\alpha} = 0$) амплитуда автомодуляции

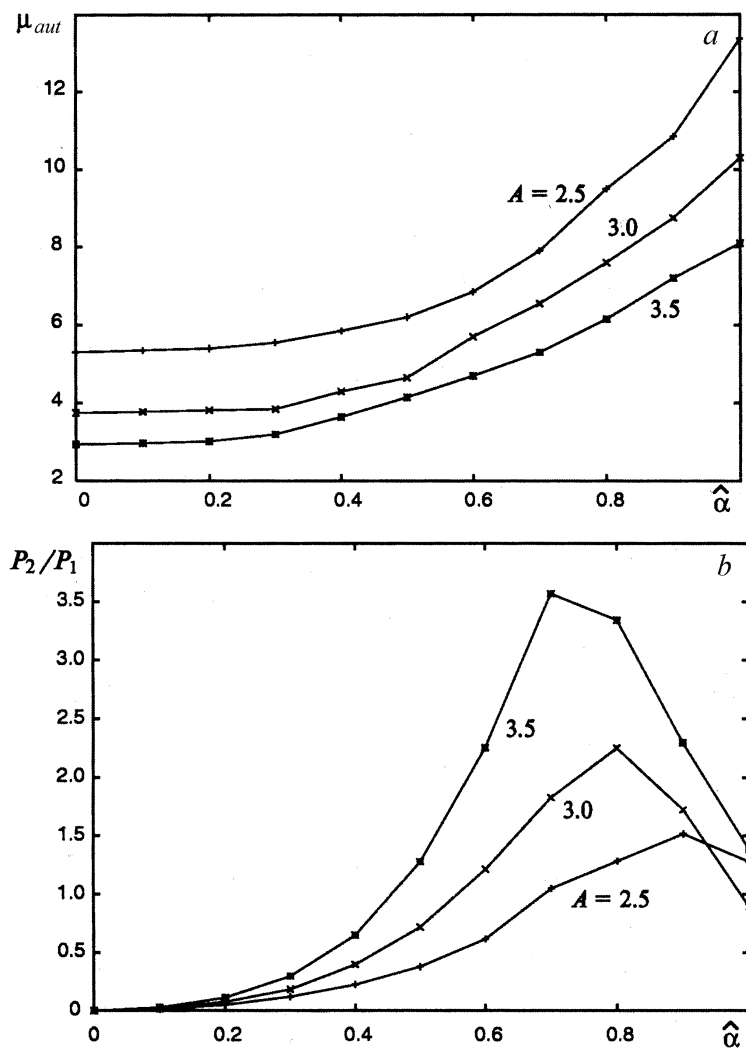


Рис. 2. Зависимость величины параметра неизохронности μ_{aut} (a), при котором наблюдается возникновение автомодуляции, и зависимости отношения потоков мощности P_2/P_1 на выходе системы вблизи границы автомодуляции $\mu_{aut}(\hat{\alpha})$ (b) от коэффициента связи $\hat{\alpha}$ для различных значений параметра A .

имела конечное значение, то при введении связи при $\hat{\alpha} > 0.2 \div 0.4$ автомодуляция возбуждается мягко — амплитуда автомодуляции равна нулю на границе области автомодуляции $\mu = \mu_{ам}(\hat{\alpha})$. Далее с ростом параметра μ имеет место увеличение амплитуды автомодуляции.

Иследуем, с чем связано такое поведение границы автомодуляции в гиро-ЛВВ СВС. Как хорошо известно [9,12], возникновение автомодуляционных режимов в СВЧ-приборах с длительным взаимодействием связано с формированием дополнительной распределенной обратной связи в системе: сгруппированный в сильном поле винтовой электронный пучок приходит к коллекторному концу системы $\xi = A$ со скоростью v_{\parallel} уже перегруппировавшись; возбуждаемое сгруппированным током поле смещается со скоростью v_g (где v_g — групповая скорость встречной электромагнитной волны в волноводе) к входному концу $\xi = 0$ системы; сгруппированный в слабом поле пучок возбуждает теперь сильное поле, в котором винтовой электронный пучок и перегруппировывается. В результате вся картина повторяется во времени с периодом $T \sim 2A(1/v_{\parallel} + 1/v_g)$, а время $T/2$ можно рассматривать как характерное время запаздывания в возникающей цепи дополнительной обратной связи.

При введении связи между двумя электродинамическими системами возникающая дополнительная обратная связь подавляется, так как теперь часть мощности встречной волны с групповой скоростью v_g , обеспечивающей обратную связь, „уходит“ в систему без винтового пучка. В результате граница области автомодуляции сдвигается в область больших значений параметра неизохронности μ (больших токов пучка). Для иллюстрации этого на рис. 2, *b* представлены зависимости отношений P_2/P_1 величин потоков мощности в волноведущих системах без пучка и с пучком от коэффициента связи $\hat{\alpha}$. Видно, что с ростом коэффициента связи в диапазоне $\hat{\alpha} \in (0.0, 0.7)$ имеет место быстрый рост мощности, „перекачиваемой“ из первой во вторую систему, так что $\sqrt{P_2/P_1} \sim \exp[\gamma\hat{\alpha}]$, где коэффициент γ лежит в диапазоне $1.2 \div 1.8$ в зависимости от длины системы. При больших коэффициентах связи $\hat{\alpha} > 0.7$ имеет место насыщение роста потока мощности P_2 . Однако рост величины $\mu_{ам}(\hat{\alpha})$ продолжается, что связано с тем, что существенный отбор мощности встречной волны в системе с пучком начинается уже вблизи входа $\xi = A$, что также способствует разрыву дополнительной обратной связи, приводящей к автомодуляции.

Заметим, что одновременно с ростом $\hat{\alpha}$ наблюдается увеличение к.п.д. стационарного режима генерации (примерно в $1.2 \div 1.4$ раза),

который достигает максимального значения при $\hat{\alpha} \approx 0.5 \div 0.6$. Это связано с тем, что распределение поля в первой волноведущей системе при данных значениях коэффициента связи наиболее оптимально для эффективного отбора энергии у электронов-осцилляторов винтового пучка.

Таким образом, применение в гиролампе со встречной волной связанных волноведущих систем позволяет отодвинуть по току границу области самовозбуждения лампы и границу области автомодуляции и в итоге получить большую выходную мощность в одночастотном режиме.

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

Список литературы

- [1] *Felch K.L., Danly B.G., Jory H.R.* et al. // Proceedings of the IEEE. 1999. V. 87. N 5. P. 752.
- [2] *Rodgers J., Guo H., Nusinovich G.S., Granatstein V.L.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2001. V. 48. N 10. P. 2434.
- [3] *Nusinovich G.S., Chen W., Granatstein V.L.* // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. N 2. P. 631.
- [4] *Nusinovich G.S., Sinityn O.V., Kesar A.* // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. N 7. P. 3427.
- [5] *Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Antonsen T.M.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. N 21. P. 218301-1.
- [6] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 18. С. 34.
- [7] *Дмитриев А.Ю., Трубецков Д.И., Четвериков А.П.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 9. С. 595.
- [8] *Chen Z.G., Döring H.* // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1984. V. 5. N 5. P. 691.
- [9] *Трубецков Д.И., Четвериков А.П.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2. № 5. С. 3.
- [10] *Исаев В.А., Фишер В.Л., Четвериков А.П.* // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. 7-я зимняя школа-семинар инженеров. Кн. 2. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1986. С. 3.
- [11] *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 Сарат. ун-та, 1986. С. 61.
- [12] *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 7. P. 1037.