

09

Подавление автомодуляции в гиросгенераторе со встречной волной внешним сигналом

© А.Е. Храмов

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

Поступило в Редакцию 9 июля 2003 г.

В окончательной редакции 30 сентября 2003 г.

Впервые с помощью численного моделирования показана возможность подавления автомодуляции выходного поля в гиросгенераторе со встречной волной путем воздействия на систему внешнего сигнала. Определены параметры внешнего сигнала, при которых наблюдается рассматриваемое явление.

Одним из перспективных устройств современной СВЧ-электроники больших мощностей является гиrolампа со встречной волной (гиро-ЛВВ), которая характеризуется высоким уровнем выходной мощности (до десятков MW) в миллиметровом диапазоне длин волн [1]. К достоинствам гирос-ЛВВ следует отнести возможность легкой перестройки частоты СВЧ-излучения за счет изменения продольной скорости электронов или статического магнитного поля [1,2]. Одним из серьезных недостатков гиросгенератора со встречной волной оказывается то, что с увеличением длины системы или тока пучка в нем быстро возникает автомодуляция выходного сигнала — спектр генерации становится многочастотным [3,4]. Одним из способов решения данной проблемы является использование распределенного отбора мощности путем при-

менения связанных волноведущих систем в giro-ЛВВ, предложенное в работах [5,6]. В данной работе рассматривается другой подход к подавлению автомодуляции в giro-ЛВВ, связанный с воздействием на распределенную автоколебательную систему „винтовой электронный пучок–встречная электромагнитная волна“, находящуюся в режиме многочастотных автоколебаний, внешнего гармонического сигнала сравнительно малой мощности.

В работах [7,8] было подробно изучено явление синхронизации автоколебаний в системе со встречной волной и винтовым электронным пучком. В представленной работе, в первую очередь, интересуемся расширением области одночастотной генерации в неавтономном giro-генераторе со встречной волной.

Система уравнений, описывающая взаимодействие винтового пучка со встречной волной, состоит из уравнения движения электронов слаборелятивистского винтового пучка [2,9] и уравнения возбуждения встречной волны электронным потоком [10], которые в безразмерном виде записываются как

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

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

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, ξ и τ — соответственно безразмерные продольная координата и время, $\mu = (v_{\parallel}/c)/2\varepsilon$ — параметр неизохронности, характеризующий меру инерционности системы, v_{\parallel} — продольная скорость винтового пучка, ε — параметр взаимодействия [2,3,7]. Уравнение (1) решается при следующих начальных условиях:

$$\beta(\xi = 0) = \exp(j\theta_0), \quad \theta_0 \in [0, 2\pi], \quad (3)$$

которые определяют, что винтовой электронный пучок не модулирован на входе. Внешний гармонический управляющий сигнал вводится на коллекторном конце системы и описывается как

$$F(\xi = A) = F_{inp} \exp[j\Omega\tau]. \quad (4)$$

Здесь A — безразмерная длина системы, F_{inp} — амплитуда внешнего сигнала, Ω — отстройка частоты внешнего воздействия от частоты „холодного“ синхронизма между встречной волной и винтовым пучком. Упрощающие предположения, положенные в основу сформулированной модели, и выражения безразмерных переменных подробно рассмотрены в работах [2,3,7].

Управляющими параметрами модели являются безразмерная длина системы A и параметр неизохронности μ и электронов-осцилляторов. Если рассматривается система с постоянным током пучка I_0 , то при постоянном μ изменение A соответствует изменению длины системы l . При неизменном l при изменении A за счет изменения тока I_0 постоянное значение сохраняет параметр μA .

Рассмотрим поведение системы при безразмерной длине пространства взаимодействия $A = 3.0$ и изменяющемся параметре неизохронности μ . Самовозбуждение лампы в этом случае наблюдается при $\mu_{st} \approx 0.73$, когда в системе устанавливается режим стационарной (одночастотной) генерации; далее при $\mu_{aut} \approx 3.78$ имеет место возникновение автомодуляции выходного поля гиро-ЛВВ, характеризующейся многочастотным спектром выходного поля, причем с ростом μ имеет место усложнение спектрального состава генерации.

Как показало проведенное численное исследование, воздействие внешнего гармонического сигнала на автоколебания в гиро-ЛВВ, находящейся в режиме автомодуляции (т.е. при $\mu > \mu_{aut}$), позволяет подавить модуляцию выходного поля и установить режимы стационарной генерации на частоте Ω внешнего воздействия, которая мало отличается от частоты ω_0 автономной генерации. Эффект подавления автомодуляции выходного поля иллюстрирует рис. 1, на котором показаны зависимости от времени амплитуды выходного поля $|F(\xi = 0, \tau)|$ гиро-ЛВВ в автономном автомодуляционном режиме (штриховая линия) и в режиме подавления автомодуляции внешним сигналом для малой $(\mu - \mu_{aut}) = 0.02$ и большой $(\mu - \mu_{aut}) = 0.80$ надкритичности. Из рис. 1 видно, что в неавтономном режиме при соответствующих параметрах (частота Ω и мощность $|F_{inp}|^2$) внешнего сигнала после некоторого переходного процесса устанавливается режим стационарной генерации, который характеризуется неизменной амплитудой выходного поля $|F(\xi = 0, \tau)| = \text{const}$ и частотой, равной частоте внешнего воздействия, близкой к частоте автономной генерации $\Omega \approx \omega_0$.

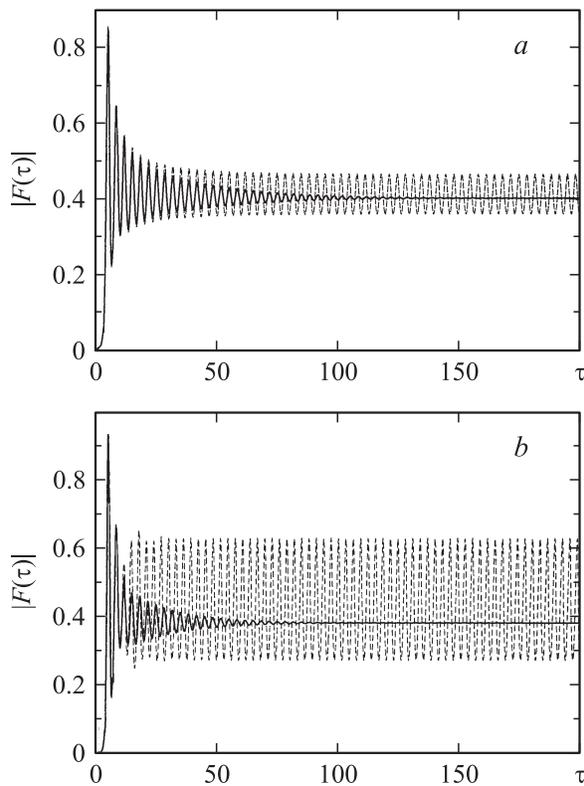


Рис. 1. Зависимости от времени амплитуды выходного поля $|F(\xi = 0, \tau)|$ giro-ЛВВ в автономном автомодуляционном режиме (штриховая линия) и в режиме подавления автомодуляции внешним сигналом для следующих случаев: *a* — малая надкритичность $(\mu - \mu_{aut}) = 0.02$ (мощность входного сигнала $P_{inp} = 0.004P_0$, частота $\Omega/\omega_0 = 1.0019$, где P_0 — выходная мощность в автономном режиме); *b* — большая надкритичность $(\mu - \mu_{aut}) = 0.80$ ($P_{inp} = 0.2P_0$, частота $\Omega/\omega_0 = 1.17$); безразмерная длина системы $A = 3.0$.

Эффект подавления автомодуляции выходного сигнала giro-ЛВВ наблюдается только в определенном диапазоне управляющих параметров внешнего сигнала. Рассмотрим этот вопрос более подробно. На рис. 2, *a* на плоскости управляющих параметров амплитуда $|F_{inp}|$ —

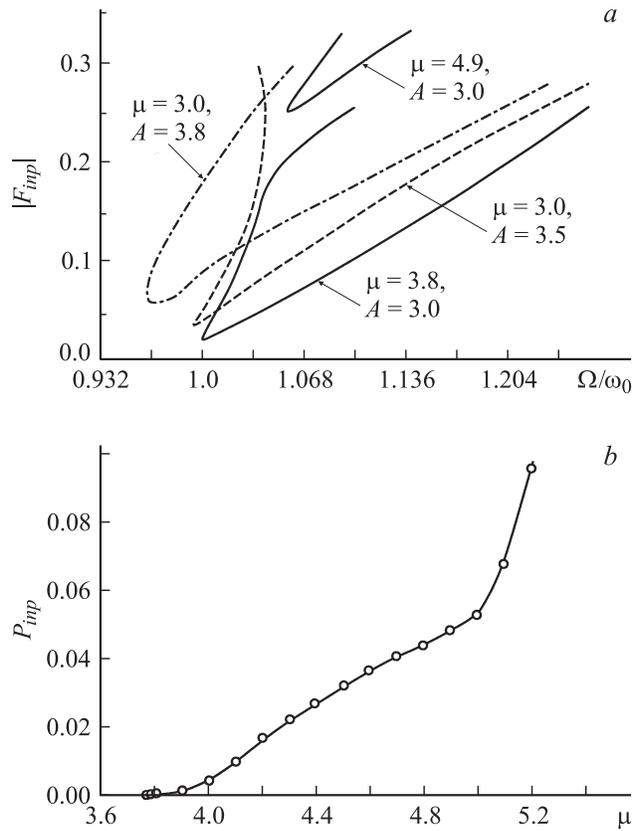


Рис. 2. *a* — границы областей на плоскости управляющих параметров амплитуды $|F_{inp}|$ — нормированная частота Ω/ω_0 внешнего поля, в которых наблюдается подавление автомодуляции выходного поля (параметры гиро-ЛВВ, при которых строились границы областей подавления автомодуляции, приведены на рисунке рядом с кривыми). Подавление автомодуляции соответствует параметрам внешнего сигнала, находящимся внутри области, ограниченной кривыми, *b* — минимальный уровень мощности P_{inp} входного сигнала, необходимый для подавления автомодуляции выходного поля, как функция параметра неизохронности μ электронов-осцилляторов, построенный при безразмерной длине $A = 3.0$. Зависимости построены в результате численного моделирования исходных уравнений нестационарной теории (1)–(4).

нормированная частота Ω/ω_0 внешнего поля показаны области, в которых наблюдается подавление автомодуляции выходного поля и установление режимов стационарной генерации, для различных значений управляющих параметров A и μ . Из рисунка видно, что режим подавления автомодуляции и установления стационарной генерации в гиро-ЛВВ имеет место при частотах внешнего воздействия, больших частоты автономной генерации: $\Omega > \omega_0$. С ростом амплитуды $|F_{inp}|$ наблюдается расширение области частот $\Delta\Omega$ внешнего воздействия, в которой имеет место подавление автомодуляции выходного поля.

С ростом надкритичности $(\mu - \mu_{aut})$ при фиксированной длине системы режим стационарной генерации возникает при большей амплитуде (мощности) $|F_{inp}|$ внешнего воздействия. Последнее иллюстрирует рис. 2, *b*, на котором показан построенный в результате численного моделирования минимальный уровень мощности P_{inp} входного сигнала, необходимый для подавления автомодуляции выходного поля, в зависимости от параметра неизохронности μ электронов-осцилляторов винтового пучка, который построен при безразмерной длине $A = 3.0$. Видно, что вблизи порога жесткого возбуждения автомодуляции $\mu \gtrsim \mu_{aut}$ необходимая мощность внешнего сигнала весьма мала $P_{inp} \ll P_0$, где P_0 — мощность генерации в автономном режиме. С ростом надкритичности вплоть до значения $(\mu - \mu_{aut}) \approx 1.45$ наблюдается медленное увеличение необходимого уровня мощности внешнего сигнала. При $\mu > 5.2$ медленное увеличение сменяется очень быстрым ростом уровня мощности внешнего сигнала, необходимого для подавления автомодуляции выходного поля.

Одновременно с ростом необходимой мощности внешнего сигнала, как видно из рис. 2, *a*, с увеличением параметра неизохронности наблюдается и сужение области частот внешнего поля, в которой имеет место установление режимов стационарной генерации в неавтономной системе (ср. кривые на рис. 2, *a*, построенные при длине системы $A = 3.0$ и параметрах неизохронности $\mu = 3.8$ и $\mu = 4.9$).

При увеличении безразмерной длины системы A параметр неизохронности, при котором имеет место возникновение автомодуляции в автономной системе, растет. Однако эффект подавления автомодуляции и установления режимов неавтономной стационарной генерации при этом также наблюдается. На рис. 2, *a* показаны области, в

которых имеет место подавление автомодуляции, построенные при $\mu = 3.0$ и двух различных безразмерных длинах системы $A = 3.5$ и $A = 3.8$. Видно, что с ростом длины системы область неавтономной стационарной генерации незначительно смещается в сторону меньших частот внешнего воздействия, при этом форма области неавтономной стационарной генерации практически не претерпевает изменений.

Кратко остановимся на физических процессах в исследуемой системе. Возникновение автомодуляции выходного поля определяется возникновением дополнительной распределенной обратной связи в системе с обратной волной [10]: 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 с групповой скоростью v_g к входному концу $\xi = 0$ системы; сгруппированный в слабом поле винтовой пучок возбуждает теперь сильное поле, в котором пучок и перегруппировывается. В результате вдоль длины системы винтовой пучок перегруппировывается в сильном ВЧ-поле, причем разрушение фазового сгустка электронов-осцилляторов винтового пучка сопровождается скачками в распределении фазы ВЧ-поля вдоль линии передачи. При воздействии на систему управляющего сигнала в области синхронизации удается разорвать дополнительную распределенную обратную связь. Это обусловлено тем, что внешний управляющий сигнал „навязывает“ исследуемой системе некоторое распределение фазы высокочастотного поля $\varphi_F(\xi)$ в пространстве взаимодействия, которое характеризуется отсутствием резких скачков фазы в пространстве и соответствует оптимальному в смысле возникновения режима стационарной генерации фазовому соотношению между волнами тока и поля в гирогенераторе со встречной волной.

Таким образом, в работе показана возможность подавления автомодуляции, возникающей в гиро-ЛВВ с увеличением тока пучка, путем воздействия на систему внешнего сигнала. Также определены условия (в первую очередь, параметры внешнего сигнала), при которых наблюдается подавление автомодуляции выходного поля.

Работа поддержана РФФИ, проект № 02-02-16351.

Список литературы

- [1] *Felch K.L., Danly B.G., Jory H.R., Kreischer K.E., Lawsom W., Levush B., Temkin R.J.* // Proceedings IEEE. 1999. V. 87 (5). P. 752.
- [2] *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.
- [3] *Дмитриев А.Ю., Трубецков Д.И., Четвериков А.П.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34 (9). С. 595.
- [4] *Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Antonsen T.M.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87 (21). P. 218301–1.
- [5] *Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29 (4). С. 63–70.
- [6] *Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2003. Т. 73 (6). С. 110–117.
- [7] *Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. XLV (9). С. 773–792.
- [8] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Изв. РАН. Сер. физич. 2002. Т. 66 (12). С. 1761–1767.
- [9] *Юлпатов В.К.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. I. Электроника. 1965. В. 12. С. 15.
- [10] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Наука, Физматлит, 2003.