

01;09;12

Исследование синхронизации автоколебаний в лампе обратной волны (теория и эксперимент)

© Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, А.А. Короновский, П.В. Попов,
В.Н. Скороходов, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410026 Саратов, Россия
e-mail: alkor@cas.ssu.runnet.ru

(Поступило в Редакцию 12 февраля 2006 г. В окончательной редакции 19 декабря 2006 г.)

Экспериментально и теоретически изучена синхронизация колебаний в электронно-волновой системе с обратной электромагнитной волной (ЛОВ). Теоретически исследованы характеристики неавтономных колебаний в ЛОВ с учетом пространственного заряда, рассмотрены физические процессы, сопровождающие переход распределенной автоколебательной системы в режим синхронизации. Проведено сопоставление теории с экспериментом.

PACS: 05.45.Xt

Введение

Проблема синхронизации автоколебаний в системах различной природы является одной из важных и интенсивно исследуемых задач современной радиофизики и теории колебаний и волн [1,2].

Одной из классических распределенных автоколебательных систем СВЧ-электроники является лампа обратной волны (ЛОВ) [3,4], в которой имеет место генерация СВЧ-излучения при взаимодействии электронного потока с обратной электромагнитной волной. В пионерской работе [5] была экспериментально показана возможность синхронизации ЛОВ внешним сигналом, вводимым по электронному пучку. В статьях [6,7] были изучены характеристики синхронного режима работы ЛОВ в рамках стационарной теории. В работе [8] были рассмотрены некоторые особенности синхронизации внешним гармоническим сигналом активной среды „электронный пучок–обратная электромагнитная волна“ в рамках простой нелинейной нестационарной теории ЛОВ без учета пространственного заряда. Однако обычно ЛОВ работают в режиме, когда влияние пространственного заряда на процессы взаимодействия существенно. В частности, с этим влиянием связано подавление автомодуляции (многочастотности) выходного СВЧ-поля [3,4]. Поэтому представляется целесообразным и важным проведение теоретических и экспериментальных исследований неавтономной динамики ЛОВ при достаточно больших значениях пространственного заряда.

В представленной работе экспериментально и теоретически (с привлечением численного моделирования на основе нелинейной нестационарной теории, учитывающей пространственный заряд) исследуется влияние внешнего гармонического сигнала на автоколебания в лампе обратной волны.

1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования влияния внешнего одночастотного сигнала на автоколебания, возбуждаемые при взаимодействии электронного пучка с обратной электромагнитной волной, были проведены на промышленном образце ЛОВ типа ОВ-4, работающей в десятисантиметровом диапазоне. Проведенные „холодные“ измерения показали, что КСВН вывода энергии ЛОВ был порядка 1.2–1.3. Из этого следует, что амплитуда волны, отраженной от локального поглотителя ЛОВ, расположенного на коллекторном конце замедляющей системы, может быть заметной.

Внешний гармонический сигнал, усиленный с помощью ЛБВ среднего уровня мощности, подавался на вывод энергии экспериментальной ЛОВ через ферритовый циркулятор (рис. 1). Падающий сигнал, естественно, не оказывает сколько-либо заметного влияния на взаимодействие электронного потока с обратной волной. Сигнал,

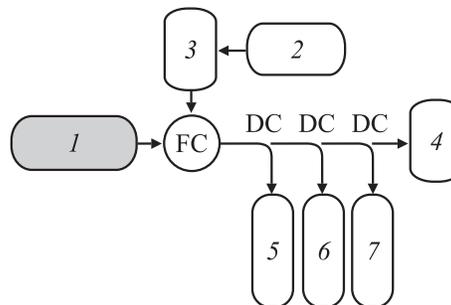


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Здесь 1 — экспериментальная ЛОВ, 2 — генератор внешнего гармонического сигнала, 3 — ЛБВ-усилитель, 4 — согласованная нагрузка, 5 — измеритель СВЧ-мощности, 6 — частотомер, 7 — спектроанализатор, DC — направленный ответвитель, FC — ферритовый циркулятор.

отраженный от локального поглотителя, существенно влияет на взаимодействие электронного пучка с синхронной обратной волной и, как следствие, на выходной сигнал ЛОВ. Следует отметить, что этот сигнал отделяется от падающей волны ферритовым циркулятором (FC) и направляется с помощью направленных ответвителей (DC) на блок измерительных приборов, включающих в себя измеритель мощности, цифровой частотомер, анализатор спектра, кристаллический детектор и нагрузку.

В ходе экспериментов можно было в широких пределах менять рабочий ток ЛОВ, ее ускоряющее напряжение, частоту и амплитуду (мощность) внешнего гармонического сигнала, подаваемого на экспериментальную ЛОВ. Заметим, что установка позволяла измерять мощность сигнала, отраженного от локального поглотителя ЛОВ при выключенном электронном потоке.

2. Теоретическая модель

Для теоретического исследования влияния внешнего гармонического сигнала на автоколебания в распределенной системе „электронный пучок–обратная электромагнитная волна“ использовались нестационарные нелинейные уравнения теории ЛОВ [3,4], в которых учитывалось влияние пространственного заряда электронного пучка:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} = \text{Re}[F - jqI] \exp(ju), \quad (1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} - \frac{\partial F}{\partial \xi} = I, \quad (2)$$

$$I = -\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-ju) du_0. \quad (3)$$

$$u(\xi = 0) = u_0, \quad u_0 \in [0, 2\pi], \quad \frac{\partial u}{\partial \xi}(\xi = 0) = 0. \quad (4)$$

Здесь уравнение (1) представляет собой уравнение движения электронов в поле синхронной электромагнитной волны с учетом пространственного заряда, (2) — уравнение возбуждения обратной пространственной гармоники электромагнитной волны, выражение (3) — интегральное соотношение для первой гармоники сгруппированного тока.

Внешний гармонический управляющий сигнал вводится на коллекторном конце системы $\xi = A$ и описывается как

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

где F_0 — амплитуда внешнего сигнала, Ω — отстройка частоты внешнего воздействия от частоты „холодного“ синхронизма $\hat{\omega}$.

В уравнениях (1)–(5) введены следующие обозначения: u — фаза электрона в поле волны, $\xi = x/L$ — продольная координата, нормированная на длину пространства взаимодействия L ; $\tau = (t - xv_0)/(Lv_0 + Lv_g)$ —

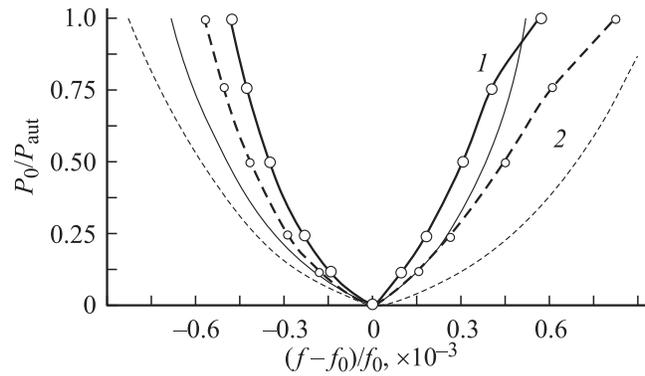


Рис. 2. Границы области стационарной генерации и захвата частоты неавтономной ЛОВ (эксперимент и теория) при отношении тока пучка к пусковому току $I/I_{st} = 2.66$. Экспериментальные зависимости показаны жирными линиями, численное моделирование — тонкими. Сплошные кривые 1 — линии разрушения режима стационарной генерации на частоте внешнего воздействия; пунктир 2 — линии разрушения режима квазисинхронизации колебаний.

безразмерное время, v_0 — скорость электронного потока на входе в систему, v_g — групповая скорость электромагнитной волны на частоте синхронизма $\hat{\omega}$, F и I — медленно меняющиеся по сравнению с $\exp[j\hat{\omega}t]$ комплексные амплитуды поля обратной волны и первой гармоники сгруппированного тока, $A = 2\pi CN$ — безразмерный параметр, имеющий смысл безразмерной длины пространства взаимодействия (заметим, что увеличение параметра A может быть интерпретировано как рост тока электронного пучка $A \sim I^3$), $C \ll 1$ — параметр усиления Пирса, N — электрическая длина лампы, $q = 4QC$ — параметр пространственного заряда [3,4].

Отметим, что именно параметр A является основным управляющим параметром ЛОВ, подобным числу Рейнольдса в гидродинамических течениях.

3. Результаты исследования синхронизации ЛОВ: эксперимент и теория

На рис. 2 представлены экспериментальная и теоретическая (полученная в результате численного моделирования) карты режимов колебаний неавтономной ЛОВ на плоскости управляющих параметров частота–мощность внешнего сигнала. Экспериментальная карта режимов построена при токе пучка $I = 2.66I_{st}$ (I_{st} — пусковое значение тока), теоретическая — при безразмерной длине¹ $A = 3.15$ и параметре пространственного заряда $q = 0.5$. При данных значениях управляющих параметров в автономной системе наблюдается режим

¹ Напомним, что безразмерный параметр A пропорционален току I электронного пучка как $A \sim I^3$. Значение $A = 3.15$, выбранное в численном моделировании, соответствует току $I = 2.66I_{st}$, который использовался в эксперименте.

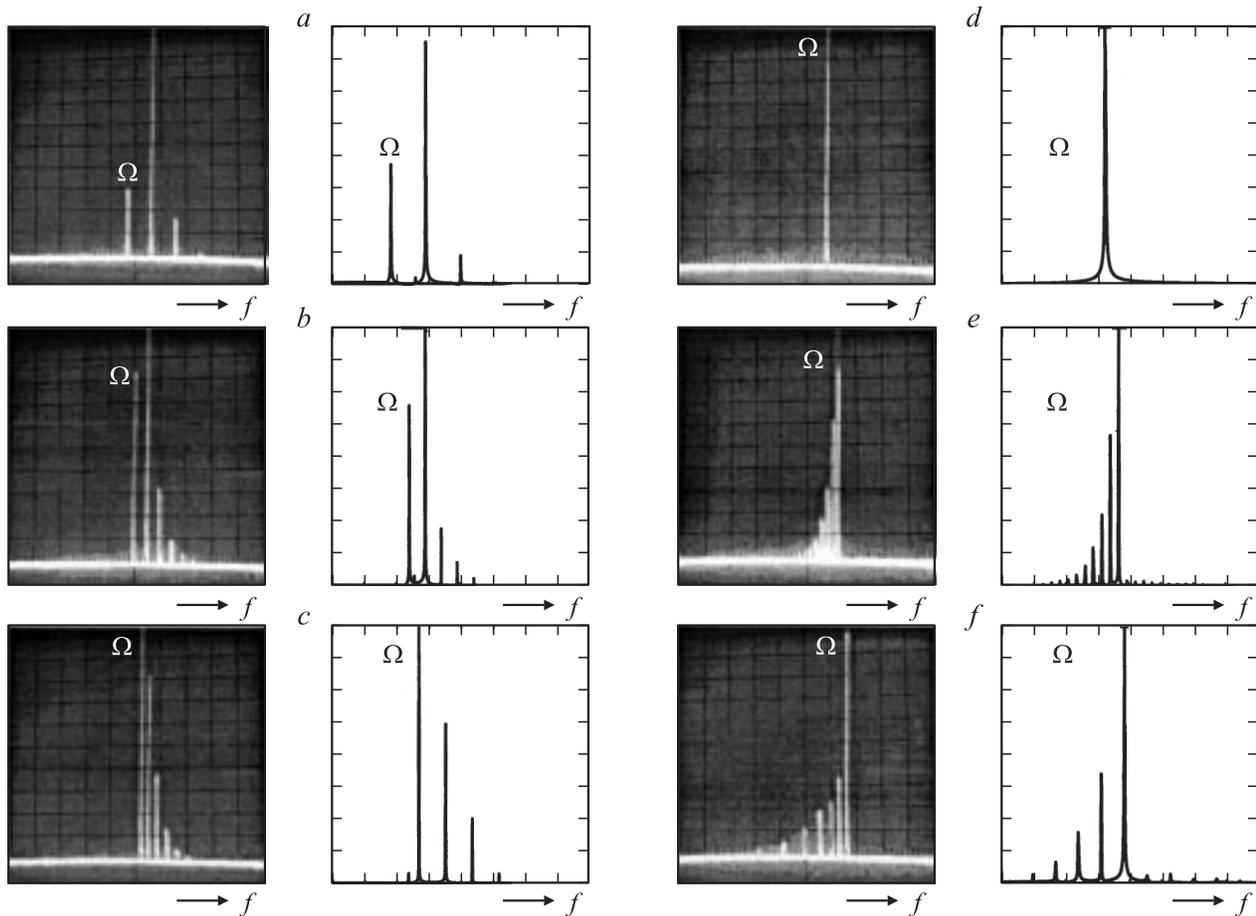


Рис. 3. Экспериментальные и теоретические спектры мощности неавтономной ЛОВ: (a) $(f_{\text{ext}} - f_0)/f_0 = -0.78 \cdot 10^{-3}$, (b) $-0.65 \cdot 10^{-3}$ (режимы биений), (c) $-0.1 \cdot 10^{-3}$ (стационарная генерация на частоте внешнего сигнала, режим синхронизации), (d) $-0.5 \cdot 10^{-3}$, (e) $0.31 \cdot 10^{-3}$, (f) $0.45 \cdot 10^{-3}$ (захват частоты на фоне модуляции выходного сигнала соответственно на НЧ- и ВЧ-границе клова синхронизации (режим квазисинхронизации)).

стационарной генерации (как в физическом эксперименте, так и численном моделировании). Заметим, что экспериментальный макет ЛОВ сконструирован так, что влияние пространственного заряда пучка на процессы взаимодействия пучка с электромагнитным полем было весьма существенным ($q \sim 0.5$). Однако определить точное значение параметра пространственного заряда в эксперименте не представлялось возможным, так как была неизвестна точная геометрия пространства взаимодействия экспериментального макета ЛОВ. Поэтому мы проводим только качественное сравнение результатов натурального эксперимента и численного моделирования.

Рис. 3 демонстрирует экспериментально полученные (с помощью спектроанализатора С4-27) и теоретически рассчитанные спектры мощности выходного сигнала неавтономной ЛОВ при различных параметрах внешнего сигнала и токе пучка $I/I_{\text{st}} = 1.2$. В спектрах на рис. 3 символом Ω отмечена частота внешнего сигнала f_{ext} . Спектры построены при постоянной мощности $P_0/P_{\text{aut}} = 0.2$ и меняющейся частоте внешнего управля-

ющего сигнала. Рассмотрим спектральные характеристики неавтономной ЛОВ более подробно.

При значительной расстройке частоты f_{ext} внешнего сигнала и частоты f_0 автономной генерации ЛОВ в системе наблюдается режим биений (рис. 3, a). В этом случае в спектре мощности наблюдается много модуляционных составляющих, расстояние между которыми близко к величине $(f_{\text{ext}} - f_0)$. С уменьшением частотной расстройки частота внешнего сигнала со стороны низких частот приближается к частоте автономной генерации ЛОВ, при этом число интенсивных модуляционных спектральных составляющих в высокочастотной области спектра увеличивается (см. рис. 3, b).

При близости частоты внешнего воздействия к частоте автономной генерации ЛОВ демонстрирует режим синхронизации (отмечен на рис. 2 сплошной линией I), в котором частота выходного сигнала f определяется частотой внешнего воздействия, а амплитуда выходного сигнала $|F(\xi = 0, \tau)|$ после окончания переходного процесса устанавливается постоянной (стационарная генерация; соответствующие экспериментальные и

теоретические спектры мощности выходного сигнала представлены на рис. 3, *d*). При пересечении значений управляющих параметров низкочастотной или высокочастотной границы области синхронизации (линия 1 на рис. 2) наблюдается переход системы в режим модуляции выходного сигнала. В этом случае амплитуда высокочастотного поля начинает периодически изменяться во времени. Однако при этом в системе в определенном диапазоне изменения частоты внешнего воздействия (между сплошной линией 1 и штриховой линией 2 на рис. 2) сохраняется режим захвата частоты генерации ЛОВ внешним сигналом. Последнее иллюстрирует экспериментальные и теоретические спектры мощности на рис. 3 *c, e, f*, которые соответствуют области на карте режимов (рис. 2) между сплошной и штриховой линиями. Из них видно, что наиболее интенсивная спектральная компонента в спектре мощности соответствует частоте внешнего воздействия.

Подобный неавтономный режим колебаний, следуя [8,9], назовем режимом квазисинхронизации. Будем понимать под ним такой неавтономный режим автоколебаний, когда динамическая система демонстрирует сложные многочастотные колебания (квазипериодические или хаотические) с базовой частотой в фурье-спектре мощности, равной частоте внешнего воздействия. Остановимся подробнее на вводимом понятии квазисинхронизации колебаний. В работах [10,11] под квазисинхронизацией колебаний понимался режим колебаний системы фазовой автоподстройки частоты, при котором разность частот генераторов в среднем устанавливается равной нулю, а разность фаз периодически изменяется с течением времени. Последнее означает, что в системе устанавливается многочастотный режим колебаний, при этом основная частота колебаний оказывается захваченной внешним гармоническим сигналом. В связи с этим представляется оправданным расширение понятия квазисинхронизации на случай неавтономных многочастотных колебаний в распределенной активной среде при захвате базовой частоты в фурье-спектре мощности внешним гармоническим воздействием. Режимы квазисинхронизации автоколебаний ранее были обнаружены в неавтономной гиролампе со встречной волной [9], в ЛОВ с поперечным полем [12], а также в однопараметрической модели ЛОВ без учета влияния пространственного заряда [8].

Следует отметить, что квазисинхронизация колебаний может быть рассмотрена как частный случай синхронизации временных масштабов, которая была введена в работе [13,14], применительно к внешней и взаимной синхронизации генераторов, находящихся в режиме многочастотных колебаний. Суть синхронизации временных масштабов заключается в следующем. Вводится множество фаз ϕ_s многочастотного сигнала, соответствующих различным временным масштабам s (или частотам $f = 1/s$ фурье-спектра). О синхронизации временных масштабов говорят в том случае, когда имеет место захват фаз хотя бы на одном из временных масштабов s ,

который называется синхронным (см. подробнее [13,14]). В случае квазисинхронизации колебаний наблюдается синхронизация фаз на временном масштабе, соответствующем частоте внешнего воздействия, в то время как колебания выходного поля неавтономной ЛОВ демонстрируют сложный многочастотный спектральный состав, и, следовательно, можно говорить об установлении в распределенной активной среде режима синхронизации временных масштабов.

Таким образом, штриховая кривая 2 на рис. 2 представляет собой линию, на которой происходит разрушение режима захвата частоты (при этом в системе в режиме захвата частоты генерации может наблюдаться модуляция амплитуды выходного поля). Сплошная кривая 1 на рис. 2 есть линия, при пересечении которой в неавтономной ЛОВ наблюдается разрушение режима стационарной генерации на частоте внешнего воздействия. Отметим хорошее качественное соответствие экспериментальных и теоретических спектральных характеристик неавтономной генерации ЛОВ, представленных на рис. 2 и 3. Интересно отметить, что со стороны высоких частот интервал между границами синхронизации и квазисинхронизации и в теории и эксперименте заметно шире, чем со стороны низких частот.

Представляется важным анализ влияния пространственного заряда на характеристики процесса синхронизации колебаний в ЛОВ внешним сигналом. Данный вопрос исследовался в рамках численного моделирования путем изменения управляющего параметра q пространственного заряда. На рис. 4 показаны зависимости нормированной ширины полосы $\Delta f_q/\Delta f_0$ синхронизации (1) и квазисинхронизации (2) от значения параметра q пространственного заряда. Нормировка осуществлялась на величину Δf_0 ширины полосы синхронизации ЛОВ при отсутствии пространственного заряда $q = 0$. Из рисунка следует, что с ростом параметра пространственного заряда наблюдается увеличение ши-

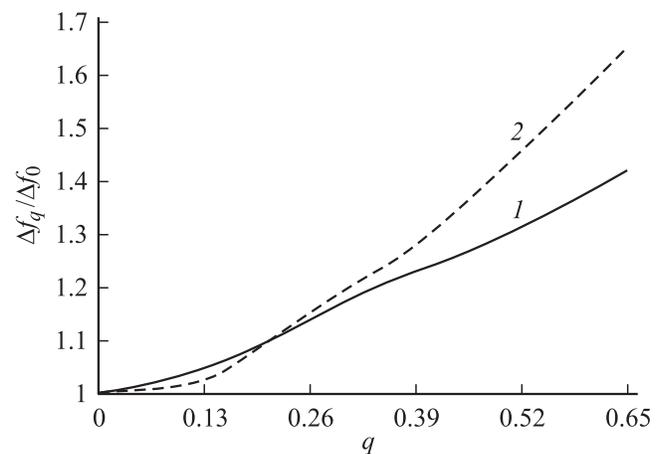


Рис. 4. Зависимости нормированной ширины полосы $\Delta f_q/\Delta f_0$ синхронизации (1) и квазисинхронизации (2) от величины параметра q пространственного заряда.

рины полос синхронизации и квазисинхронизации лампы обратной волны.

Отметим, что воздействие внешнего сигнала на режим периодических колебаний в ЛОВ со значительным влиянием пространственного заряда позволяет перевести лампу в режим хаотической генерации. В автономном режиме работы ЛОВ подобные режимы достижимы только при значительных токах пучка и не всегда достижимы на практике. В неавтономной ЛОВ хаотические колебания возникают при сравнительно большой мощности внешнего сигнала на границе полосы квазисинхронизации. При этом возможно установление режимов хаотических колебаний, когда базовая наиболее интенсивная спектральная компонента в спектре мощности хаотического сигнала соответствует частоте внешнего сигнала („синхронный“ хаос) и когда базовая спектральная компонента в спектре мощности выходного поля отлична от частоты внешнего сигнала („асинхронный“ хаос).

На рис. 5 показаны спектры мощности хаотических колебаний в неавтономной ЛОВ, построенные в результате численного моделирования и соответствующие случаям „асинхронного“ (рис. 5, *a*) и „синхронного“ (рис. 5, *b*) хаоса. Спектры построены при относительной мощности входного сигнала $P_0/P_{\text{aut}} = 0.04$, стрелкой в спектре отмечена частота внешнего воздействия. Последнее означает, что воздействие даже небольшого по мощности внешнего сигнала позволяет перевести ЛОВ в режим хаотической генерации, что в ряде случаев представляется важным на практике (см., например, [15]). Отметим также, что режимы хаотической генерации наблюдаются как на низкочастотной, так и на высокочастотной границе синхронизации ЛОВ.

Рассмотрим, основываясь на результатах численного моделирования, физические процессы в неавтономной лампе обратной волны. В [8,9] было показано, что с точки зрения физических процессов в электронном пучке, взаимодействующем со встречной волной, воздействие внешнего управляющего сигнала сводится к влиянию на внутреннюю распределенную обратную связь, имеющую место в генераторе на винтовом пучке и встречной электромагнитной волной. Режимы синхронизации и квазисинхронизации соответствуют возникновению во всем пространстве взаимодействия с безразмерной длиной A режимов колебаний ВЧ-поля с базовой частотой, соответствующей частоте внешнего воздействия. Разрушение режимов захвата частоты генерации внешним сигналом и переход к режиму биений сопровождается формированием двух характерных областей пространства взаимодействия. В одной из областей, примыкающих ко входу ЛОВ с длиной A_s (длиной синхронизации), имеют место колебания, характерная базовая частота которых равна частоте внешнего сигнала, а в другой (длиной $A - A_s$) — наблюдается разрушение синхронизации, и имеют место колебания в пространстве взаимодействия с базовой частотой отличной от частоты управляющего сигнала. Граница области синхронизации соответствует условию

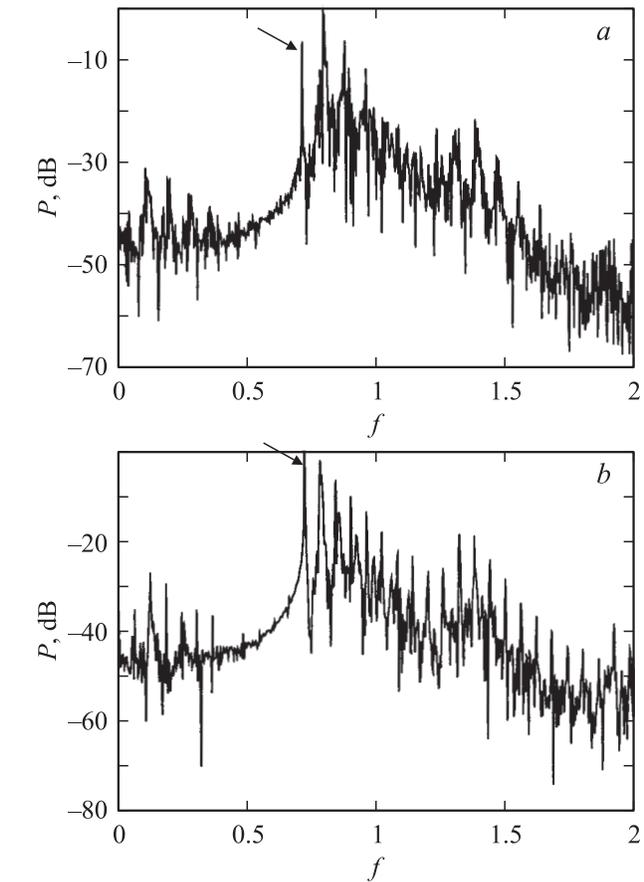


Рис. 5. Спектры выходного сигнала ЛОВ в режиме хаотической неавтономной генерации, построенные при следующих значениях параметров: $A = 3.0$, $q = 0.5$, $P_0/P_{\text{aut}} = 0.04$ и (а) $(f_{\text{ext}} - f_0)/f_0 = 0.43 \cdot 10^{-3}$; (б) $0.45 \cdot 10^{-3}$. Стрелкой в спектрах отмечена частота внешнего сигнала f_{ext} .

$A \equiv A_s$. На границе области синхронизации $\xi \sim (A - A_s)$ имеют место скачки фазы поля и перегруппировка электронов пучка. Механизм возникновения модуляции выходного сигнала в неавтономной ЛОВ определяется нарушением оптимальных фазовых условий между электронной и электромагнитной волной и, как следствие, формированием дополнительной распределенной обратной связи.

Для иллюстрации вышесказанного на рис. 6 показаны спектры колебаний ВЧ-поля в различных точках пространства взаимодействия ЛОВ, численно построенные для мощности внешнего воздействия $P_0/P_{\text{aut}} = 0.02$ и различных частот f_{ext} внешнего воздействия, соответствующих различным характерным режимам неавтономной генерации.

Рис. 6, *a* соответствует режиму биений ЛОВ, когда на выходе лампы наблюдаются многочастотные колебания ВЧ-поля с основной частотой в спектре мощности, отличной от частоты внешнего воздействия. Из рисунка видно, что на вход лампы ($\xi = A$) подается одночастотный сигнал. Далее, по мере распространения внешнего

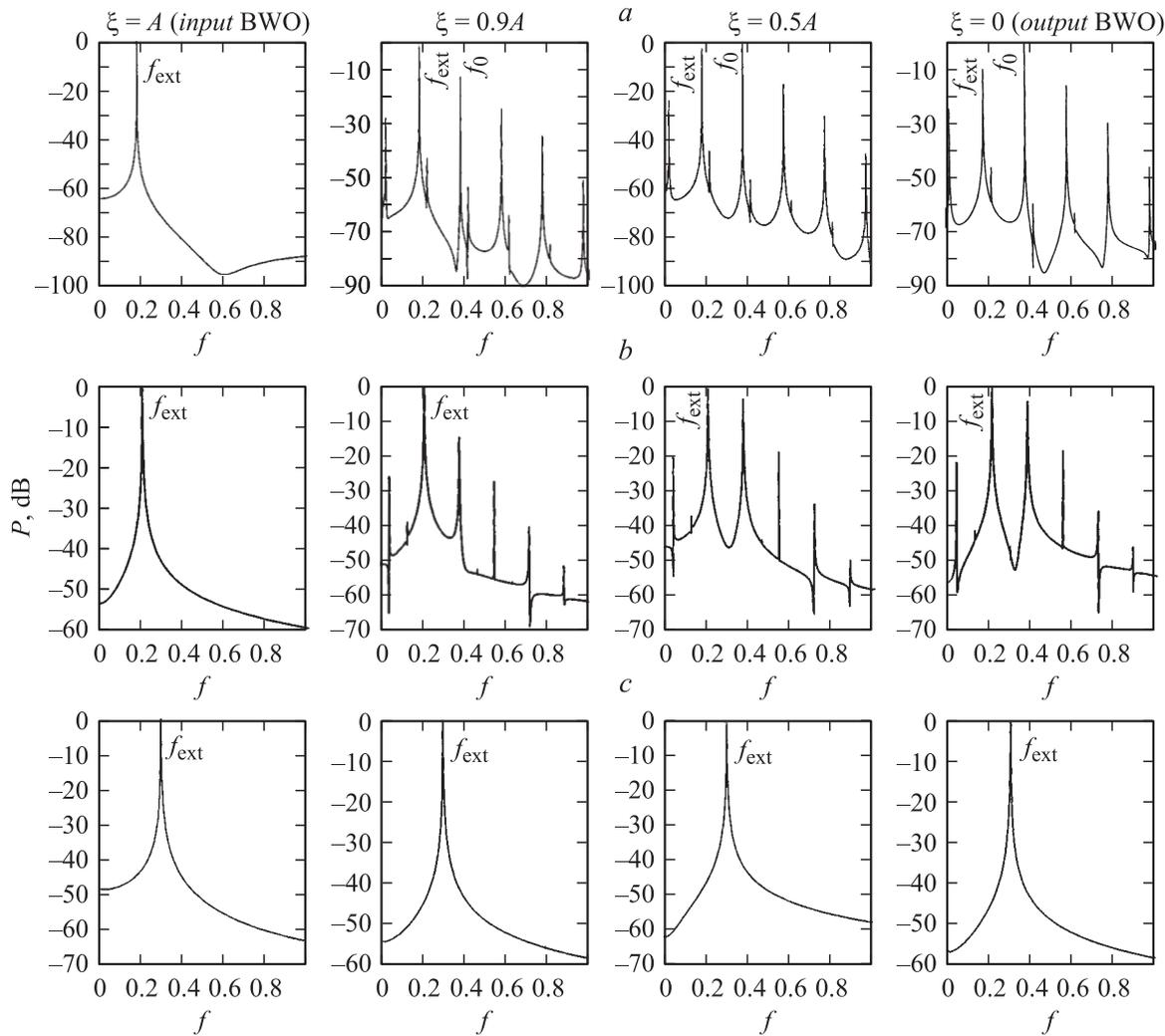


Рис. 6. Спектры мощности колебаний ВЧ-поля в различных сечениях пространства взаимодействия ЛОВ для режимов биений (*a*), квазисинхронизации (*b*) и синхронизации (*c*).

сигнала к выходу лампы спектральный состав колебаний ВЧ электромагнитного поля усложняется (см. спектры, соответствующие $\xi < A$). В области, примыкающей ко входу ЛОВ, наиболее интенсивной в спектре мощности колебаний оказывается спектральная компонента, частота которой соответствует внешнему сигналу. Далее, при продвижении вдоль пространства взаимодействия ее интенсивность уменьшается, а интенсивность частоты генерации неавтономной ЛОВ растет. Длина пространства взаимодействия, при которой в спектре по мощности преобладает частота внешнего воздействия необходимо рассматривать как длину синхронизации A_s . Для рассматриваемого случая длина синхронизации $A_s \approx 0.5A$. Это хорошо видно из спектра мощности, построенного для сечения $\xi = 0.5A$ пространства взаимодействия: в этом сечении спектральные компоненты в спектре мощности, соответствующие частоте внешнего сигнала и базовой частоте генерации неавтономной ЛОВ, практически одинаковы по мощности. Вблизи выхода ЛОВ

мощность спектральной компоненты, соответствующей частоте внешнего сигнала, сравнительно мала и базовая частота в спектре мощности близка к частоте генерации автономной ЛОВ.

Иная ситуация складывается в режиме квазисинхронизации колебаний. В этом случае во всем пространстве взаимодействия наиболее интенсивной спектральной компонентой является та, которая соответствует частоте внешнего воздействия (см. рис. 6, *b*, на котором показана эволюция спектра мощности колебаний поля вдоль пространства взаимодействия в режиме квазисинхронизации). Видно, что спектральный состав колебаний ВЧ-поля остается практически неизменным при прохождении сигнала вдоль пространства взаимодействия, причем основная базовая частота в спектре мощности соответствует частоте внешнего сигнала.

Наконец, рис. 6, *c* соответствует режиму синхронизации колебаний в ЛОВ. Видно, что во всех точках пространства взаимодействия колебания происходят с

одной частотой, которая равна частоте внешнего поля, подаваемого на коллекторный конец лампы.

Выводы

В работе экспериментально и теоретически исследовано влияние внешнего гармонического сигнала на автоколебания в ЛОВ. Рассмотрены характеристики синхронного и асинхронного режима работы неавтономной ЛОВ. Теоретически показано, что увеличение пространственного заряда электронного пучка приводит к расширению полосы частот синхронизации ЛОВ. С увеличением тока пучка происходит уменьшение ширины полосы частот, в которой наблюдается захват частоты генерации ЛОВ внешним сигналом. Изучены физические процессы в неавтономной электронно-волновой среде с обратной волной, показано, что выход из режима синхронизации сопровождается формированием двух характерных областей пространства взаимодействия, в одной из которых имеют место колебания на частоте внешнего сигнала, а в другой — наблюдается разрушение синхронизации и имеют место колебания в пространстве взаимодействия на частоте, отличной от частоты управляющего сигнала.

Результаты теоретического изучения неавтономной динамики ЛОВ находятся в хорошем качественном соответствии с результатами физического эксперимента по воздействию внешнего сигнала, вводимого на коллекторном конце, на генерацию ЛОВ со значительным пространственным зарядом пучка.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН, проф. Д.И. Трубецкову за интерес к данной работе и полезные критические замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 06-02-16451-а и 06-02-81013-Бел-а), программы поддержки Ведущих научных школ России, а также CRDF (грант REC-006). Авторы также благодарят ФНП „Династия“ и МЦФФМ за финансовую поддержку.

Список литературы

- [1] *Блехман И.И.* Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981.
- [2] *Пиковский А.С., Розенблом М.Г., Куртс Ю.* Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
- [3] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
- [4] *Электроника ламп с обратной волной* / Под ред. В.Н. Шевчика и Д.И. Трубецкова. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975.
- [5] *Канавец В.И.* // Вестник МГУ. Сер. III. 1961. № 2. С. 32.
- [6] *Солнцев В.А.* // Электронная техника. Электроника СВЧ. 1966. № 9. С. 30.
- [7] *Железовский Б.Е., Кальянов Э.В.* Многочастотные режимы в приборах СВЧ. М.: Связь, 1978.
- [8] *Храмов А.Е.* // РИЭ. 2004. Т. 49. № 7. С. 859–868.
- [9] *Трубецков Д.И., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. XLVII. № 5–6. С. 343–372.
- [10] *Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А.* Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972.
- [11] *Шахгильдян В.В., Белюстина Л.Н.* Системы фазовой синхронизации. М.: Радио и связь, 1982.
- [12] *Храмов А.Е.* // РИЭ. 2004. Т. 49. № 12. С. 1405–1410.
- [13] *Hramov A.E., Koronovskii A.A.* // Chaos. 2004. Vol. 14. N 3. P. 603–610.
- [14] *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Moskalenko O.I.* // Phys. Rev. E. 2005. Vol. 71. N 5. P. 056 204.
- [15] *Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Новожилова Ю.В., Сергеев А.С., Ткаченко А.К.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 20. С. 66.