

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Синхронизация и переключение мод внешним сигналом в резонансной
лампе обратной волны**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 215 группы
направления 03.04.01 «Прикладные математика и физика»
факультета нелинейных процессов

Уманцовой Олеси Викторовны

Научный руководитель,
профессор, д.ф.-м.н.

Рыскин Н.М.

Зав. кафедрой,
д.ф.-м.н., профессор

Рыскин Н.М.

Саратов 2016 год

ВВЕДЕНИЕ

Лампа обратной волны (ЛОВ) является одним из наиболее распространенных приборов вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. ЛОВ находят широкое применение в качестве генераторов электромагнитных колебаний с электронной перестройкой частоты в широких пределах [1]. Значительный интерес представляют ЛОВ с сильноточными релятивистскими электронными пучками — релятивистские карсинотроны [1,2]. Они являются одними из наиболее мощных источников микроволнового излучения, их пиковая выходная мощность может достигать нескольких гигаватт. Подобные источники могут представлять интерес, например, для систем наносекундной радиолокации [2].

Отметим, что в последние годы появилось большое число работ, посвященных исследованию неавтономной динамики ЛОВ, а также других мощных СВЧ генераторов. Эта задача является актуальной по ряду причин. Прежде всего, воздействие слабым внешним сигналом позволяет уменьшить время старта, т.е. длительность переходного процесса [3,4], что особенно важно в случае релятивистских карсинотронов, работающих в режиме коротких импульсов (порядка десятков наносекунд). Синхронизация мощного генератора сигналом от внешнего высокостабильного источника позволяет повысить стабильность частоты и фазы генерируемого сигнала (применительно к релятивистской ЛОВ этот вопрос обсуждался, например, в [5-7]). Наконец, внешнее воздействие позволяет осуществить быструю скачкообразную перестройку частоты генерации за счет эффекта переключения мод [8-10].

Как известно, значительное влияние на работу ЛОВ (в особенности — релятивистских) оказывает отражение излучения от границ замедляющей системы. Электродинамическая система релятивистской ЛОВ по сути представляет собой многомодовый распределенный резонатор [11]. Конкуренция собственных мод резонатора в значительной степени определяет динамику нестационарных процессов [12,13]. Поэтому следует

ожидать, что картина синхронизации ЛОВ внешним сигналом будет иметь ряд существенных отличий по сравнению с классической картиной, хорошо изученной для систем с малым числом степеней свободы. Далее, следует отметить, что в ЛОВ по мере увеличения тока пучка наблюдается сложная последовательность автомодуляционных и хаотических колебательных режимов [12-15]. Таким образом, представляет интерес изучение воздействия внешнего сигнала на ЛОВ в различных режимах генерации: одночастотном, многочастотном, хаотическом. Вообще следует отметить, что теория синхронизации распределенных автоколебательных систем развита еще недостаточно.

Цель выполнения выпускной квалификационной работы состоит в выяснении основных закономерностей синхронизации и переключения мод внешним сигналом в многомодовой резонансной ЛОВ.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Модернизация программы компьютерного моделирования неавтономного резонансного ЛОВ-генератора на основе нестационарной нелинейной теории.

2. Моделирование процессов синхронизации генератора, работающего в одночастотном режиме. Расчет областей синхронизации на плоскости параметров частота–амплитуда внешнего сигнала, выяснение основных механизмов установления синхронизации.

3. Выяснение механизмов перехода в режим синхронизации в генераторе, работающем в многочастотном автомодуляционном режиме.

4. Моделирование переключения мод внешним сигналом, нахождение оптимальных параметров, при которых возможно эффективное переключение мод сигналом малой амплитуды.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые построена картина синхронизации многомодовой резонансной ЛОВ внешним сигналом. Изучены основные механизмы перехода в режим синхронизации. Впервые

изучен эффект переключения мод за счет включения/выключения слабого внешнего сигнала.

Научная значимость работы обусловлена тем, что воздействие внешним сигналом позволяет стабилизировать частоту и фазу генерируемого излучения, что важно для ряда приложений, в частности, в радиолокации. За счет эффекта переключения мод можно реализовать быструю скачкообразную перестройку частоты генерации, что также представляет интерес для радиолокации. Результаты работы также имеют фундаментальное значение для развития общей теории синхронизации многомодовых распределенных автоколебательных систем.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, всего 13 страниц. В главе 1 описывается устройство и принцип действия ЛОВ, уравнения нестационарной нелинейной теории ЛОВ, обсуждаются граничные условия при наличии отражений. В главе 2 рассматривается моделирование процессов синхронизации и переключения мод внешним сигналом. В главе 3, изучены механизмы перехода в режим синхронизации по мере увеличения амплитуды внешнего сигнала. Рассматриваются две характерные ситуации: когда автономный генератор работает в одночастотном режиме и в режиме автомодуляции.

Результаты дипломной работы докладывались на студенческих конференциях ФНП СГУ (2015, 2016), на Школе-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (2014, 2015), на Всероссийских конференциях «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (2014, 2015) и опубликованы в работах [16-21].

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** описаны устройство и принцип действия ЛОВ (п. 1.1). Далее в п. 1.2 приведены известные из литературы уравнения нестационарной нелинейной теории ЛОВ [12-15]. При наличии отражений излучения от границ замедляющая структура ЛОВ представляет собой резонансную колебательную систему (распределенный резонатор) [11-13]. В п. 1.3 обсуждается постановка граничных условий в случае ЛОВ с отражениями, на которую воздействует внешний сигнал. Получены выражения для частот и добротностей собственных мод распределенного резонатора. В п. 1.4 обсуждаются интегралы исходных уравнений — законы сохранения. В результате получено соотношение, связывающее мощность источника внешнего сигнала и амплитуду сигнала, поступающего в резонатор.

В **главе 2** изложены результаты моделирования процессов синхронизации и переключения мод внешним сигналом. В качестве тестовых расчетов были воспроизведены результаты по динамике автономной ЛОВ, которые хорошо согласуются с результатами, представленными в литературе [13] (п. 2.1).

В п. 2.2 исследуется переключение мод в резонансной ЛОВ внешним сигналом. На рис. 1 представлены зависимости амплитуды выходного сигнала от времени и спектры, иллюстрирующие эффект переключения мод. В отсутствие внешнего воздействия генерируется мода, собственная частота которой $\Omega \approx -1.286\pi$ (кривая 1). При воздействии внешним сигналом с частотой $\Omega \approx -1.5\pi$, по окончании достаточно длительного переходного процесса происходит установление колебаний на частоте внешнего воздействия (кривая 2). Этот режим соответствует захвату внешним сигналом. Более того, для переключения мод не обязательно достижение захвата собственной частоты. В случае малой амплитуды воздействия (кривая 3) мощности внешнего сигнала недостаточно для захвата. Однако если выключить внешний сигнал в момент времени $\tau = 50$, то возникает режим свободной генерации с частотой $\Omega \approx -1.6\pi$. Отметим, что выходная

мощность в этом случае больше, чем в случае захвата. Таким образом, в данном случае переключение мод достигается не с помощью захвата, а с помощью кратковременной предварительной модуляции пучка.

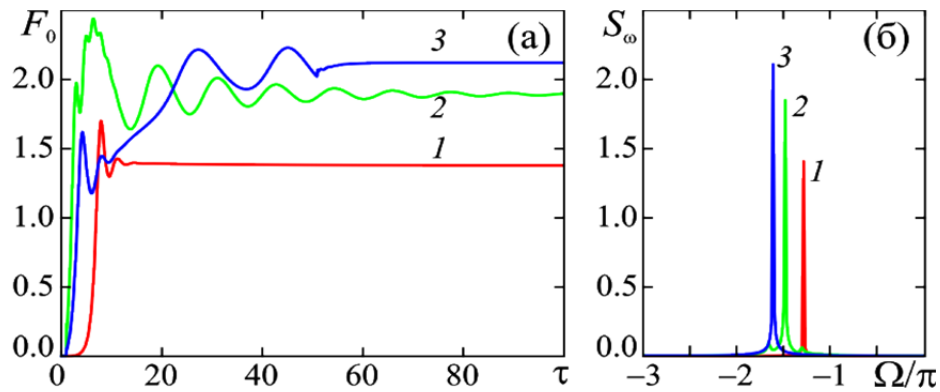


Рис. 1. Зависимости амплитуды выходного сигнала от времени (а) и спектры (б), иллюстрирующие эффект переключения мод. 1 — режим свободной генерации. 2 — захват соседней моды внешним сигналом малой амплитуды; 3 — переключение мод при кратковременном внешнем воздействии. Внешний сигнал выключается в момент времени $\tau = 50$.

В п. 2.3 рассчитаны границы области синхронизации на плоскости параметров частота входного сигнала Ω — амплитуда A_{inj} . Результаты приведены на рис. 2. Область синхронизации состоит из трех языков. В каждом из этих языков происходит захват одной из собственных мод. В этом наглядно проявляются особенности синхронизации резонансной ЛОВ как распределенного многомодового генератора. Язык, соответствующий основной моде, утыкается в горизонтальную ось в точке, где частота равна частоте генерации автономной системы.

Когда в режиме свободной генерации возникает автомодуляция, т.е. одновременно возбуждаются несколько мод (рис. 2в), ни один из языков не касается оси, т.е. появился порог синхронизации, что типично для задач синхронизации многочастотных колебаний. Кроме того, в основной язык синхронизации вклинивается область биений. В этой области собственная

мода остается захваченной внешним сигналом, однако происходит возбуждение другой моды с частотой $\Omega \approx -3.6\pi$.

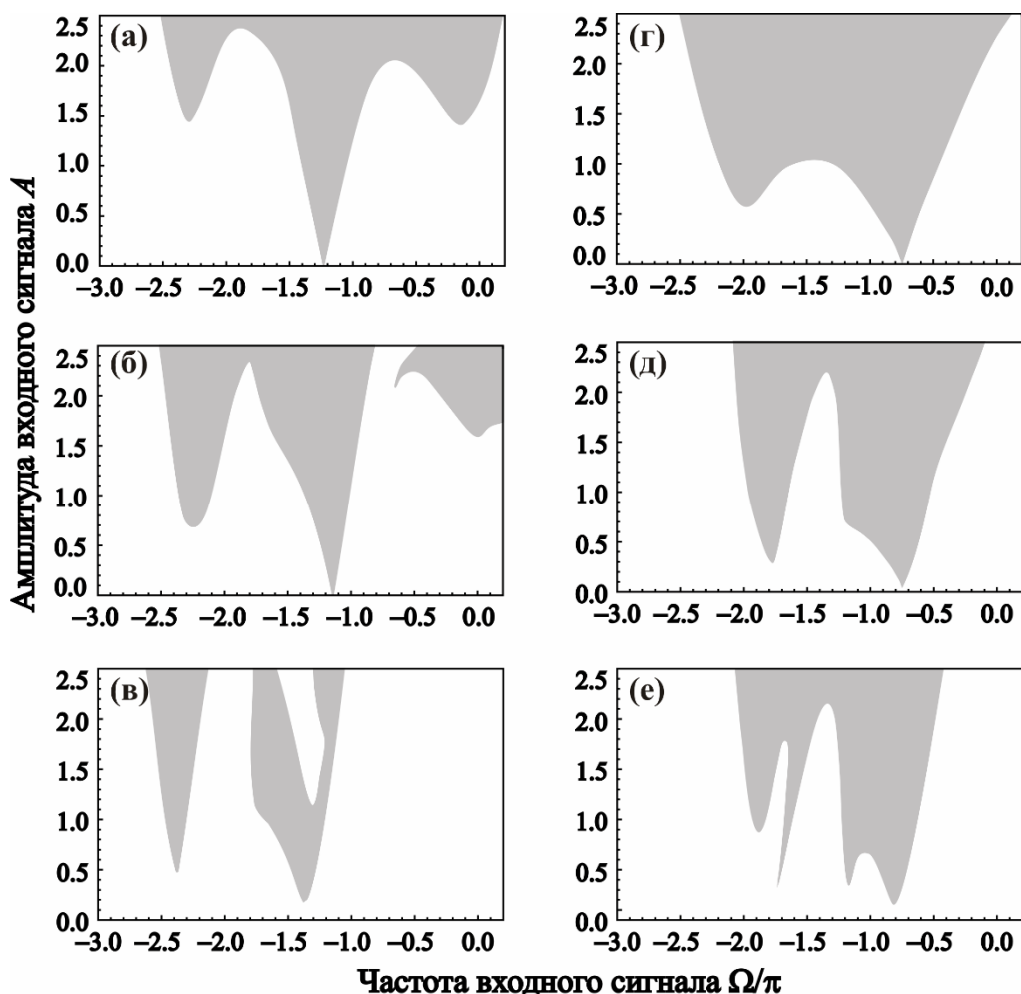


Рис. 2. Области синхронизации на плоскости параметров (Ω, A) в центре зоны генерации (слева) и вблизи границы двух зон (справа).

Далее было рассмотрено воздействия на генератор, когда значение фазы параметра отражений близко к границе двух зон генерации. На рис. 2г видно, что имеется два языка, соответствующие двум собственным модам. Однако по сравнению с рис. 2а область синхронизации является значительно более широкой. Таким образом, выбор рабочего режима вблизи границ зон генерации является наиболее выгодным, так как при этом обеспечивается более широкая полоса синхронизации за счет перекрытия языков, отвечающих различным модам.

В главе 3 изучены сценарии перехода в режим синхронизации при различных значениях частоты входного сигнала. Рассматривались случаи, когда автономный генератор работает в различных режимах: в одночастотном (п. 3.1) и в автомодуляционном (п. 3.2). В последнем случае воздействие на генератор слабого внешнего сигнала приводит к тому, что возбуждаются квазипериодические колебания с тремя независимыми частотами. По мере увеличения мощности входного сигнала происходит переход от трёхчастотного режима к двухчастотному, а затем — к одночастотному. Эти переходы могут происходить по различным сценариям. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости выходного сигнала от времени и спектры, иллюстрирующие различные сценарии. Были выбраны параметры вблизи границы двух зон при небольшом превышении порога автомодуляции. По мере увеличения амплитуды источника A_{inj} вначале происходит захват частоты основной моды внешним сигналом (рис 3б). Хорошо видно, как частота соответствующей моды приближается к частоте воздействия, и как увеличивается период биений. При дальнейшем увеличении A_{inj} происходит подавление автомодуляционной моды, что хорошо видно на рис. 3в-д. Таким образом, наблюдается своего рода комбинация механизмов захвата и подавления, характерная для синхронизации системы с одной степенью свободы.

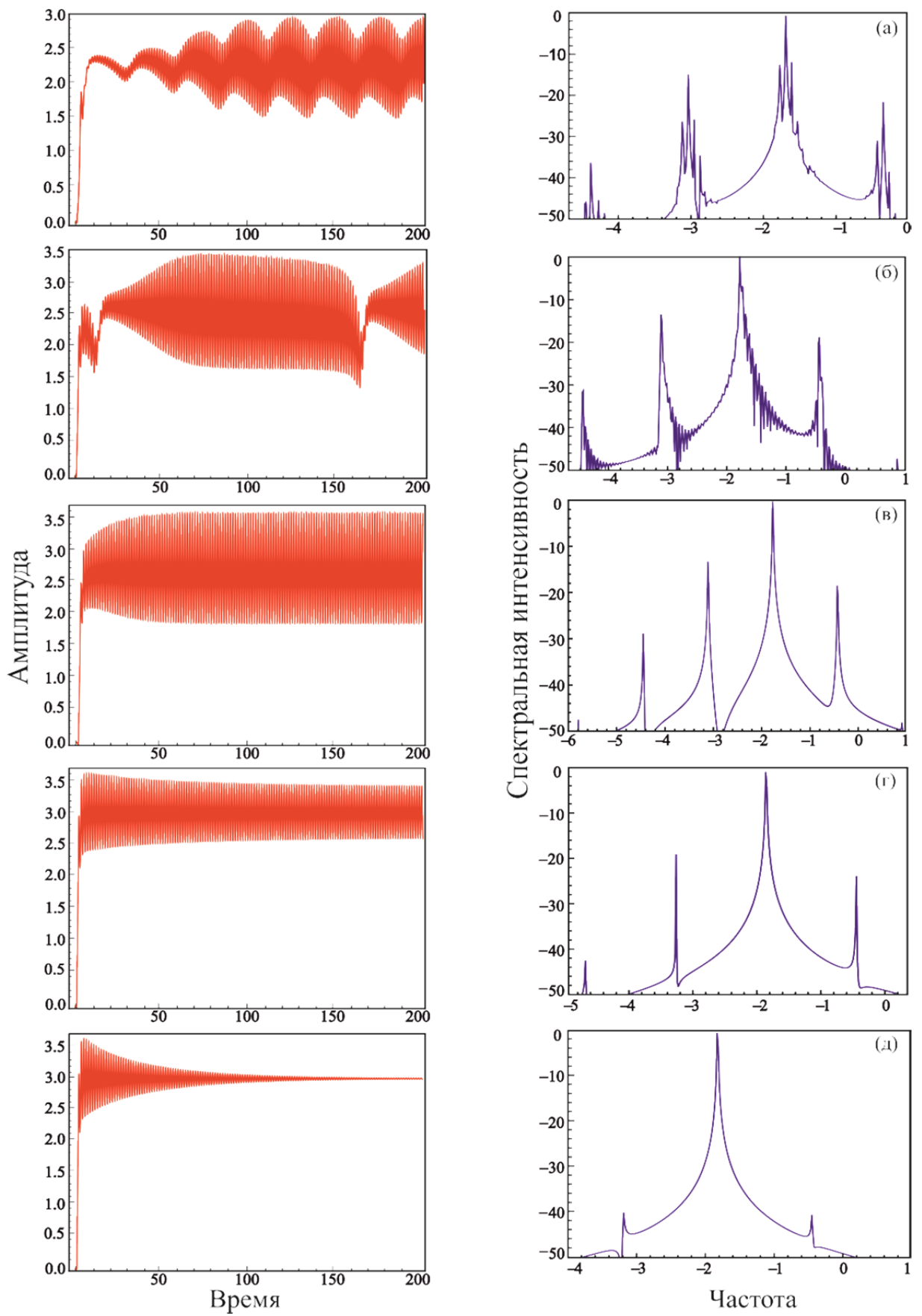


Рис. 3. Зависимости выходного сигнала от времени и спектры при $\Omega = -1.8\pi$ и различных значениях амплитуды входного сигнала $A_{inj} = 0.1$ (а), 0.3 (б), 0.4 (в), 0.57 (г), 0.69 (д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислим основные результаты, полученные в ходе выполнения магистерской работы.

1. Программа компьютерного моделирования нестационарных нелинейных процессов в резонансной ЛОВ была модифицирована на случай воздействия внешнего сигнала. С ее помощью были построены границы самовозбуждения и автомодуляции для автономной системы, обнаружен эффект жесткого перехода между режимами генерации различных мод.

2. Был изучен эффект переключения мод в резонансной ЛОВ внешним сигналом. Выяснено, что оптимальные параметры для реализации этого эффекта лежат в окрестности точки жесткого перехода. При этом достаточно очень малой мощности (порядка 6×10^{-3} от мощности выходного сигнала) для переключения частоты. Более того, переключение частоты возможно не только при непрерывном воздействии внешнего сигнала, когда реализуется режим захвата, но и при кратковременном воздействии. В этом случае переключение мод достигается за счет предварительной модуляции пучка.

3. Исследована синхронизация резонансной ЛОВ с отражениями, когда автономный генератор работает в одночастотном режиме. Построены области синхронизации на плоскости параметров амплитуда — частота внешнего воздействия. Они имеют вид нескольких языков синхронизации на частотах различных собственных мод. При увеличении безразмерной длины системы L (что соответствует увеличению тока пучка в эксперименте), торможение пучка приводит к усилению взаимодействия с более низкочастотными модами, фазовая скорость для которых меньше. Языки, соответствующие этим модам, увеличиваются в размерах и опускаются в область меньших амплитуд воздействия, а языки, соответствующие более высокочастотным модам, наоборот, поднимаются вверх и уменьшаются.

4. При переходе в автомодуляционный режим языки отрываются от горизонтальной оси, т.е. появляется порог синхронизации. Форма языков

усложняется. В них вклиниваются области многочастотных колебаний, в которых возбуждается одна из высших мод.

5. Наиболее широкая полоса синхронизации обеспечивается при воздействии на генератор, в котором значение фазы параметра отражений близко к границе двух зон генерации. В этом случае языки синхронизации соседних мод перекрываются и, соответственно, ширина полосы синхронизации увеличивается.

6. Были изучены сценарии перехода в режим синхронизации при увеличении амплитуды внешнего сигнала для различных значений его частоты. Обнаружен ряд отличий от классической картины синхронизации, хорошо изученной для системы с одной степенью свободы. Эти отличия обусловлены многомодовой распределенной природой рассматриваемой системы. В частности, наблюдаются комбинации сценариев захвата и подавления, хорошо известных из теории синхронизации генератора с одной степенью свободы. При воздействии на генератор в автомодуляционном режиме происходит переход от трехчастотных квазипериодических колебаний к двухчастотным, а затем — к одночастотным. Когда частота внешнего сигнала находится вблизи частоты основной моды, по мере увеличения мощности воздействия вначале происходит захват этой моды внешним сигналом, а затем — подавление побочной (автомодуляционной) моды. Если же частота внешнего сигнала отстоит от основной достаточно далеко, вначале происходит установление резонанса, когда отстройка частоты автомодуляционной моды от основной становится кратной отстройке частоты внешнего сигнала. Далее наблюдается захват основной частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Н. Новгород, ИПФ РАН. 2012. 576 с.
2. Gold S.H., Nusinovich G.S. // *Rev. Sci. Instrum.* 1997. Vol. 68, No. 11. P. 3945-3974.
3. Song W., Teng Y., Zhang Z.Q., Li J.W., Sun J., Chen C.H., Zhang L.J. // *Phys. Plasmas.* 2012. Vol. 19, 083105.
4. Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Конюшков А.П., Солуянов Е.И., Ястребов В.В. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2014. Т. 57, № 5. С. 413-419.
5. Xiao R.H., Chen C.H., Song W., Zhang X., Sun J., Song Z., Zhang L.J., Zhang L.G. // *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 110, 013301.
6. Xiao R.Z., Song Z.M., Deng Y.Q., Chen C.H. // *Phys. Plasmas.* 2014. Vol. 21, No. 9. 093108.
7. Xiao R.Z., Deng Y.Q., Chen C.H., Sun J., Zhang L.J., Shi Y.C., Liu J. // *IEEE Trans. Electron Devices.* Dec. 2014. Vol. 61, No. 12, P. 4253-4258.
8. Nusinovich G.S., Sinitsyn O.V., Antonsen T.M. // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98, No. 20. 205101.
9. Liu M., Michel C., Prasad S., Fuks M.I., Schamiloglu E., Liu C.-L. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. 251501.
10. Liu M., Liu C.-L., Galbreath D., Michel C., Prasad S., Fuks M.I., Schamiloglu E. // *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 110. 033304.
11. Main W., Cannel Y., Ogura K., Weaver J., Nusinovich G.S., Kobayashi S., Tate J.P., Rodgers J., Bromborsky A., Watanabe S., Amin M.R., Minami K., Destler W.W., Granatstein V.L. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1994, Vol. 22, No. 5, P. 566-577.
12. Levush B., Antonsen T.M., Bromborsky A., Lou W.R., Carmel Y. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1992. Vol. 20, No. 3. P. 263-280.
13. Рыскин Н.М., Титов В.Н. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2001. Т. 44, № 10. С. 860-874.
14. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1978. Т. 21, № 7. С. 1037-1052.

15. Рыскин Н.М., Титов В.Н. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6, № 1. С. 75-92.
16. Ryskin N.M., Titov V.N., Umantsiva O.V. Synchronization and mode switching in a resonant backward-wave oscillator // Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications. Proc. 9th International Workshop. Nizhny Novgorod, 2014. P. 157.
17. Уманцева О.В., Титов В.Н., Рыскин Н.М. Исследование неавтономной динамики резонансной лампы обратной волны // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. IX Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. С. 187-188.
18. Уманцева О.В., Титов В.Н., Рыскин Н.М. Исследование неавтономной динамики резонансной лампы обратной волны // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тезисы докладов X Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2015. С. 173-174.
19. Уманцева О.В. Синхронизация и переключение мод в резонансной лампе обратной волны // Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2014: Сборник материалов научной школы-конференции. Саратов: ООО ИЦ «Наука». 2015. С. 122-126.
20. Ryskin N.M., Titov V.N., Umantsiva O.V. Synchronization and Mode Switching in a Resonant Backward Wave Oscillator // Abstracts of the Sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC2015) April 27-29, 2015, Beijing, China.
21. Ryskin N.M., Titov V.N., Umantsiva O.V. Phase locking and mode switching in a backward-wave oscillator with reflections // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. Vol. 44, No. 6.