

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

**Исследование синхронизации многомодового генератора на основе  
лампы бегущей волны**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 214 группы  
направления 03.04.01 Прикладная математика и физика факультета нелиней-  
ных процессов

Глуховой Анастасии Владимировны

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

Н.М. Рыскин

Зав. кафедрой нелинейной физики

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

Н.М. Рыскин

Саратов 2017 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование нелинейной динамики приборов вакуумной СВЧ электроники в последние годы привлекает большое внимание в связи с возможными применениями в современных системах радиолокации и связи, основанных на использовании динамического хаоса, в установках нагрева плазмы и т. д. (см., например, [1]). Лампа бегущей волны (ЛБВ) является одним из наиболее распространенных приборов вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники [2,3]. Обычно ЛБВ используется в качестве широкополосного усилителя, однако для ряда приложений могут представлять интерес ЛБВ-генераторы с внешней запаздывающей обратной связью (ЗОС) или же резонансные ЛБВ, в которых обратная связь осуществляется за счет отражения излучения от концов замедляющей системы. В частности, следует упомянуть шумотрон, разработанный в ИРЭ АН СССР еще в 1960-е гг. [4]. В последние годы ведутся разработки новых миниатюрных ЛБВ терагерцевого диапазона[5]. Однако в этом диапазоне отсутствуют источники входного сигнала достаточно большой мощности. Поэтому рядом авторов были разработаны генераторы с ЗОС на основе подобных ЛБВ [6-8]. В работе [9] была теоретически и экспериментально изучена система передачи информации с помощью широкополосного хаотического сигнала с управляемыми характеристиками на основе ЛБВ-генератора. Предполагалось, что управление колебаниями можно осуществлять посредством изменения глубины обратной связи и фазового набега. Однако оказалось, что это требует очень высокой точности регулировки параметров. Поэтому в качестве управляющего элемента был использован источник внешнего сигнала, так как, регулируя его мощность и частоту, можно изменять режимы колебаний генератора. Впоследствии эксперименты с передачей информации с помощью ЛБВ-генератора хаотических колебаний были продолжены в Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) [10].

С фундаментальной стороны, в настоящее время большое внимание привлекает развитие теории синхронизации многомодовых автоколебатель-

ных систем. Однако применительно к ЛБВ-генераторам эти вопросы практически не рассматривались. Как известно, ЛБВ-генератор может демонстрировать разнообразные режимы колебаний: одночастотные, многочастотные и хаотические [1,9,11-13], поэтому представляет интерес управление режимами колебаний с помощью внешнего сигнала.

Также отметим, что в последние годы появилось большое число работ, посвященных исследованию различных вопросов воздействия внешнего сигнала на динамику мощных СВЧ генераторов, таких как ЛОВ, резонансная ЛБВ, магнетрон, гиротрон и др. [14-21]. Этот круг задач представляет интерес, поскольку синхронизация мощного генератора сигналом от внешнего высокостабильного источника позволяет повысить стабильность частоты и фазы генерируемого сигнала, уменьшить время старта, т.е. длительность переходного процесса, а также обеспечить управляемую перестройку частоты. Наибольшее число работ посвящено релятивистским резонансным ЛОВ. ЛБВ генератор обладает более густым спектром собственных мод, чем резонансная ЛОВ, поэтому следует ожидать, что картина синхронизации внешним сигналом будет иметь более богатый характер.

Таким образом, тема выпускной квалификационной работы является **актуальной**.

**Целью** работы является выяснение основных закономерностей синхронизации и переключения мод внешним сигналом в многомодовом ЛБВ-генераторе с ЗОС.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Расчет режимов работы ЛБВ-усилителя и автономного ЛБВ-генератора для значений управляющих параметров, типичных для ЛБВ сантиметрового диапазона.

2. Моделирование режимов синхронизации в неавтономном ЛБВ-генераторе. Выяснение структуры областей синхронизации на плоскости параметров частота – амплитуда внешнего сигнала, определение механизмов перехода в режим синхронизации.

3. Модернизация программы компьютерного моделирования ЛБВ-генератора с учетом сил пространственного заряда и локального поглотителя.

4. Исследование процессов синхронизации в генераторе с параметрами, соответствующими генератору, который исследовался экспериментально [22].

**Научная новизна** работы состоит в том, что в ней впервые построена достаточно подробная картина синхронизации многомодового ЛБВ-генератора внешним сигналом. Показано, что на область синхронизации на плоскости параметров частота — амплитуда внешнего сигнала имеет сложную структуру с многочисленными «языками» на частотах различных собственных мод. Изучены сценарии перехода в режим синхронизации при воздействии на частотах основной и высших собственных мод, а также на частотах, находящихся примерно посередине между собственными частотами.

**Научная и практическая значимость** полученных результатов обусловлена тем, что они расширяют представления о процессах синхронизации многомодовых автоколебательных систем и могут быть использованы для улучшения характеристик генераторов СВЧ диапазона. Синхронизация генератора сигналом от маломощного высокостабильного источника позволяет стабилизировать частоту и фазу генерируемого излучения, что важно для ряда приложений, в частности, в ускорительной технике и радиолокации. Также представляет интерес задача перестройки частоты генерации при воздействии внешнего сигнала. В ряде случаев этот способ более удобен, чем перестройка частоты путем изменения самих параметров генератора (тока, напряжения и т.д.).

Работа состоит из 3-х разделов. В первом разделе описывается устройство ЛБВ, принцип действия, основные уравнения и математическая модель. Также приведены результаты тестовых расчетов характеристик усилителя и характеристик генератора с запаздывающей обратной связью без учета внешнего воздействия. Во втором разделе приведены результаты моделирования процессов синхронизации. Построены языки синхронизации на плос-

кости параметров частота— амплитуда входного сигнала, зависимости амплитуды выходного сигнала от времени и спектры в режиме свободной генерации и при различных значениях амплитуды входного сигнала. В третьем разделе приведены результаты расчетов для конкретной ЛБВ диапазона 9-12 ГГц с параметрами близкими к экспериментальным[22]. При этом программа компьютерного моделирования нестационарных процессов в ЛБВ-генераторе была модифицирована с учетом сил пространственного заряда, затухания в замедляющей системе и локального поглотителя.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первом разделе** описаны устройство и принцип действия ЛБВ. Схема ЛБВ-генератора приведена на рис. 1. Обычно в цепь обратной связи (ОС) включают регулируемый аттенюатор и фазовращатель, что позволяет изменять глубину ОС и набег фазы сигнала. Генерация возникает, если коэффициент усиления превышает ослабление в цепи ОС. Для этого ток пучка должен превышать определенное значение, называемое пусковым или стартовым.

Приведены известные из литературы [1,2,12] уравнения нестационарной нелинейной теории взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной в случае узкополосного сигнала для ЛБВ-генератора с запаздывающей обратной связью

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = -L^2 \left( 1 + \frac{1}{2\pi N} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right)^3 \operatorname{Re} \left[ F e^{i\theta} + iq \sum_m \frac{I_m e^{im\theta}}{m} \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} + \frac{\partial F}{\partial \xi} + dF = -LI_1. \quad (2)$$

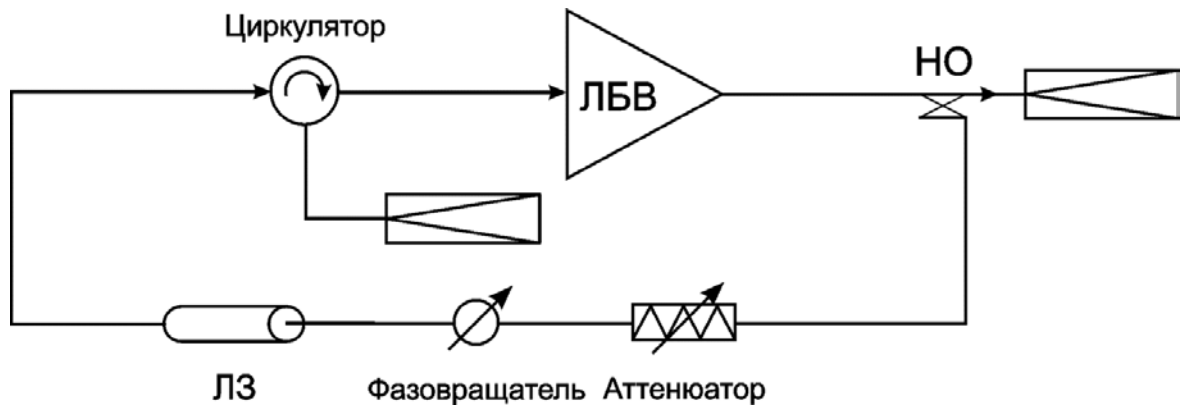


Рис. 1. Схема ЛБВ-генератора с запаздывающей обратной связью (ЗОС). НО — направленный ответвитель, ЛЗ — линия задержки.

Здесь (1)— уравнение движения электронов в поле электромагнитной волны, (2)— уравнение возбуждения волны током с медленно меняющейся амплитудой. В этих уравнениях введены нормированные координата и время

$$\xi = z/l, \quad \tau = \frac{t - z/v_0}{l/v_g - l/v_0}, \quad (3)$$

где  $v_g$  — групповая скорость медленной волны,  $l$  — длина пространства взаимодействия, а также безразмерная амплитуда поля

$$F(\xi, \tau) = \frac{\mathcal{E}}{2\beta_e V_0 C^2}, \quad (4)$$

где  $\beta_e = \omega_0/v_0$ ,  $C = (I_0 K / 4V_0)^{1/3}$  — параметр усиления Пирса,  $I_0$  и  $V_0$  — постоянный ток пучка и напряжение соответственно,  $K$  — сопротивление связи. Также в (1),(2) введены безразмерные параметры  $N = \beta_e l / 2\pi$  — электрическая длина,  $L = 2\pi CN$ ,  $d$  — параметр затухания,

$$I_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-im\theta) d\theta_0. \quad (5)$$

$m$ -я гармоника сгруппированного тока (нормированная на постоянный ток пучка  $I_0$ ),  $\theta_0$  — начальные фазы электронов, где  $q = 4QC = (\omega_p / \omega_0 C)^2$  — параметр ПЗ ( $\omega_p$  — плазменная частота).

Уравнения, описывающие динамику ЛБВ, следует дополнить граничными и начальными условиями. Граничные условия для электронного пучка имеют вид

$$\theta|_{\xi=0} = \theta_0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0 \quad (6)$$

Они означают, что на вход волноведущей структуры поступает невозмущенный электронный поток, не модулированный ни по скорости, ни по плотности.

В случае неавтономного генератора с внешней ОС необходимо добавить граничные условия для сигнала, поступающего по цепи ОС с выхода ЗС на ее вход

$$F(\tau; \xi = 0) = RF(\tau - \delta; \xi = 1) + A \exp(i\Omega t), \quad (7)$$

где  $R = \rho e^{i\psi}$  — комплексный параметр обратной связи,

$$\delta = \frac{v_0 v_g (\Delta t + l/v_0)}{l(v_0 - v_g)} \quad (8)$$

— нормированное время запаздывания,  $\Delta t$  — время, за которое сигнал проходит по цепи ОС,  $A$  и  $\Omega$  — амплитуда и частота внешнего сигнала. Параметры  $\rho$  и  $\psi$  регулируются соответственно аттенюатором и фазовращателем, которые изображены на рис. 1.

В разд. 1 также приведены результаты тестовых расчетов характеристик усилителя и характеристик генератора с запаздывающей обратной связью без учета внешнего воздействия. Построены амплитудно-частотная и амплитудная характеристики усилителя (зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты и от амплитуды входного сигнала, соответственно). Построены границы зон самовозбуждения генератора на плоскости параметров  $L, \psi$  а также зависимости амплитуды и частоты стационарной генерации от  $\psi$ , которые демонстрируют мультистабильность и гистерезис. Проиллюстриро-

ваны типичные сценарии возникновения автомодуляции. Результаты хорошо согласуются с данными приведенными в литературе.

Во **втором разделе** приведены результаты моделирования процессов синхронизации. Были построены границы области синхронизации на плоскости параметров  $\Omega, A$ . Видно, что область синхронизации состоит из нескольких языков, в каждом из которых происходит захват одной из собственных мод. В этом наглядно проявляются особенности ЛБВ как распределенного многомодового генератора.

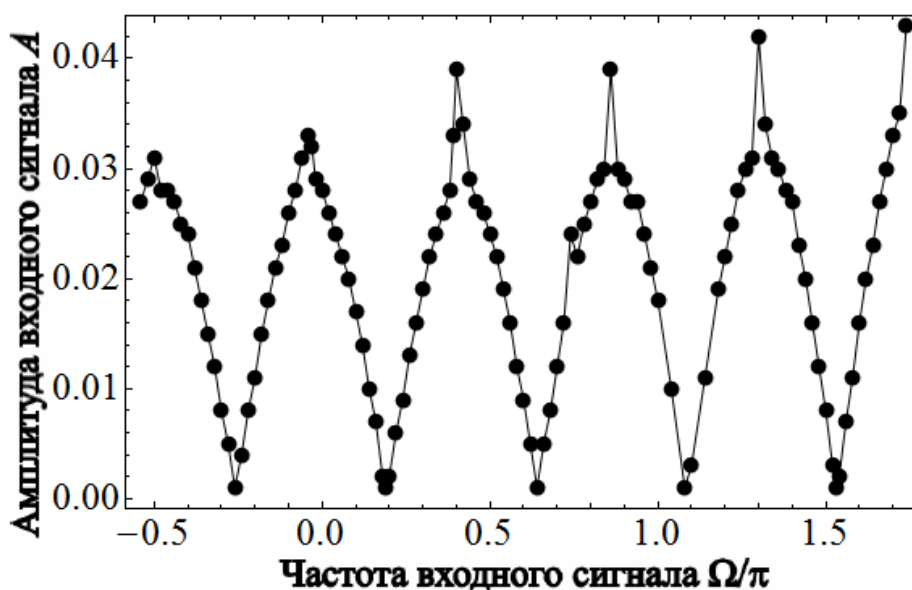


Рис. 2. Области синхронизации на плоскости параметров  $\Omega, A$

Также были построены зависимости амплитуды выходного сигнала от времени и спектры в режиме свободной генерации и при различных значениях амплитуды входного сигнала  $A$ . В качестве примера на рис. 3. приведены зависимости амплитуды выходного сигнала от времени и спектры, соответствующие различным сценариям. В данном случае наблюдается механизм синхронизации посредством захвата частоты. Хорошо видны биения, когда амплитуда выходного сигнала осциллирует, а в спектре присутствуют собственная частота генератора и частота внешнего сигнала.



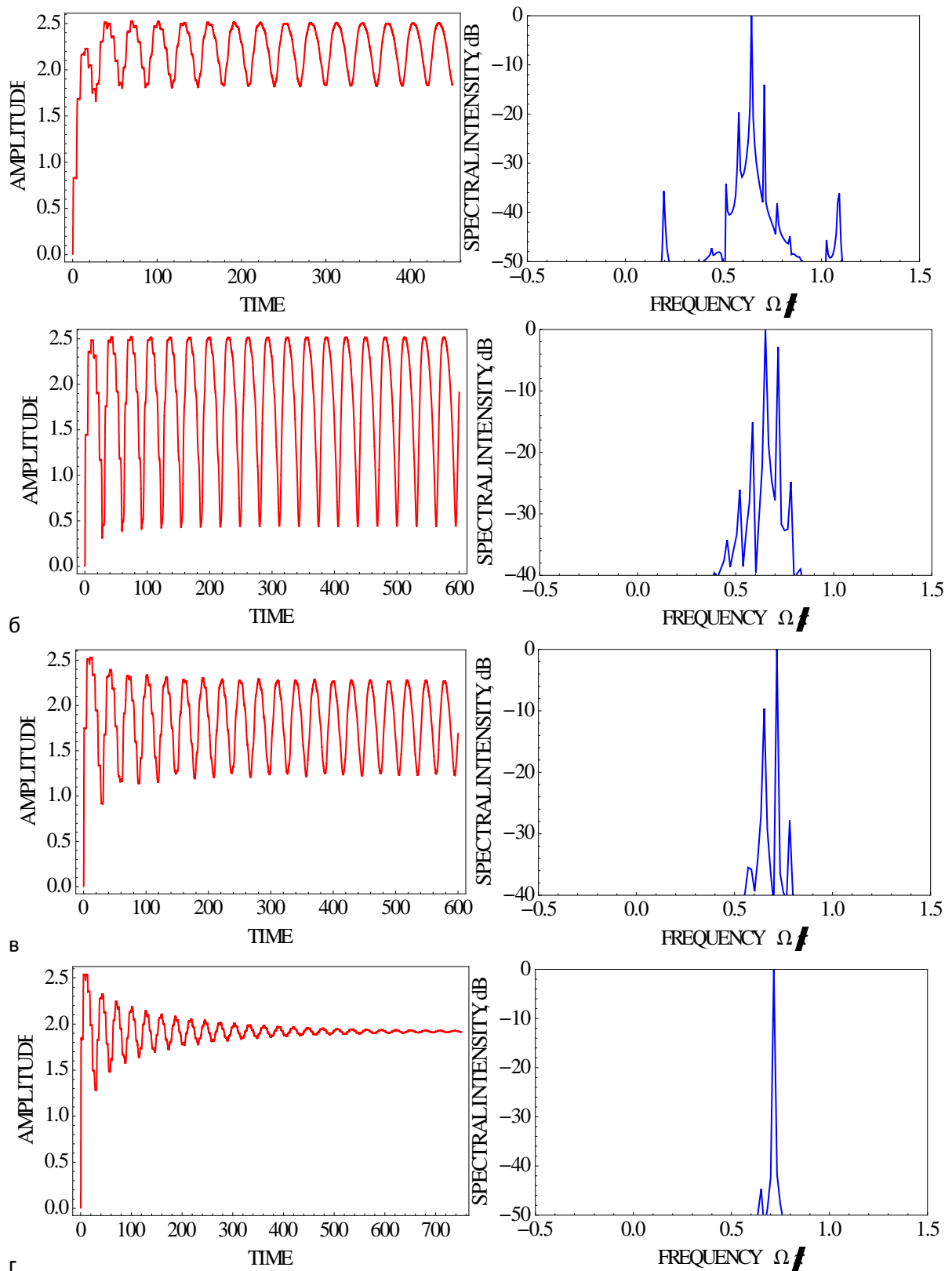


Рис. 3. Зависимости выходного сигнала от времени и спектры при воздействии в окрестности основной частоты  $\Omega = 0.7\pi$ , при  $L=7,0$ ;  $\delta = 4,0$ ;  $\psi = 0$ ;  $\rho=0,01$  и различных значениях амплитуды внешнего сигнала  $F_{in} = 0.006$  (а),  $0.011$  (б),  $0.014$  (в),  $0.015$  (г).

Также были изучены механизм уменьшения длительности переходного процесса и эффект переключения мод в ЛБВ-генераторе внешним сигналом.

В **третьем разделе** приведены результаты расчетов для конкретной ЛБВ диапазона 9-12 ГГц с параметрами близкими к экспериментальным. По данным, предоставленным сотрудниками АО «НПП Алмаз», были подобраны соответствующие аппроксимирующие функции для зависимостей замедления, сопротивления связи и затухания от частоты. Были найдены дисперсионная характеристика и групповая скорость в рабочем диапазоне частот, определена частота синхронизма при рабочем напряжении. В результате определены основные параметры численной модели: параметр Пирса, электрическая длина, параметр пространственного заряда, безразмерное время задержки.

Получена формула для коэффициента усиления ЛБВ в режиме большого пространственного заряда с учетом распределенного затухания и построены соответствующие зависимости.

Также проведено моделирование процессов синхронизации в генераторе на основе подобной ЛБВ.

Как видно из рис. 4, в этом случае наблюдается типичный сценарий захвата частоты. При малой амплитуде внешнего воздействия возникают биения, представляющие собой двухчастотные квазипериодические колебания. Когда амплитуда  $F_{in}$  превышает пороговое значение, биения скачком пропадают и устанавливаются одночастотные колебания на частоте внешнего воздействия.

Обратим внимание, что приведенные на рис. 4 зависимости выходного сигнала от времени и спектры колебаний похожи на режимы, наблюдавшиеся экспериментально в работе [22].

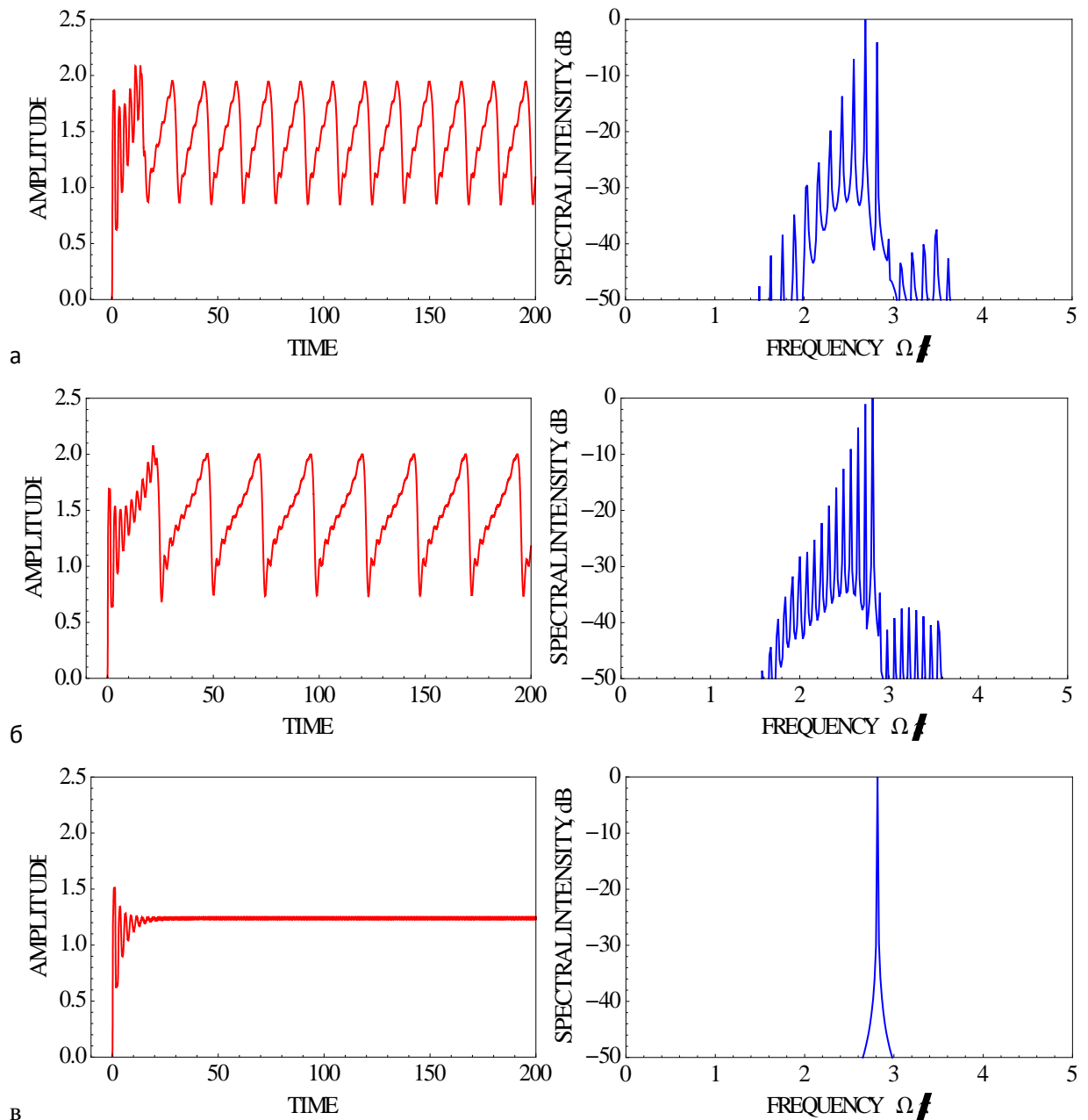


Рис. 4. Зависимости выходного сигнала от времени и спектры, иллюстрирующие синхронизацию посредством захвата собственной частоты генератора внешним сигналом с частотой  $\Omega = 2.8\pi$  и амплитудой  $F_{in} = 0.01$  (а),  $0.012$  (б) и  $0.014$  (в).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие основные результаты.

1. Была модифицирована программа компьютерного моделирования нестационарных нелинейных процессов в неавтономном ЛБВ-генераторе с ЗОС с учетом сил пространственного заряда и распределенного затухания.

Программа позволяет учитывать произвольное число гармоник тока и поля пространственного заряда. В том числе, она позволяет моделировать ЛБВ с локальным поглотителем.

2. Исследована синхронизация ЛБВ с ЗОС, в случае 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.

3. Изучены сценарии перехода в режим синхронизации для различных значений частоты внешнего сигнала и различных амплитуды внешнего воздействия. Когда частота внешнего воздействия близка к частоте основной моды ( $\Omega \approx 0.65\pi$ ), которая возбуждается в автономном генераторе, наблюдаются классические сценарии захвата и подавления частоты.

При воздействии на частоте побочной моды ( $\Omega \approx 1.1\pi$ ) на начальной стадии переходного процесса основная мода быстро подавляется, после чего происходит подавление побочной моды внешним сигналом.

При воздействии на промежуточной частоте  $\Omega = 0.85\pi$  наблюдается резкое возрастание порогового значения амплитуды внешнего сигнала. Это связано с тем, что частота внешнего воздействия удовлетворяет условию параметрического четырехфотонного распада. В данном случае распадный процесс препятствует подавлению собственных мод, в результате чего значение амплитуды воздействия, при котором происходит синхронизация, резко повышается.

4. Изучен эффект переключения мод в ЛБВ-генераторе внешним сигналом. Выявлено, что даже кратковременное воздействие внешним сигналом очень малой амплитуды (на порядок меньше той, которая требуется для синхронизации генератора при непрерывном воздействии) на частоте основной моды быстро подавляет побочные моды на начальной стадии переходного

процесса. Это позволяет значительно уменьшить время установления колебаний по сравнению с автономным генератором.

Аналогично при кратковременном воздействии на частоте побочной моды после выключения внешнего сигнала быстро устанавливаются колебания побочной моды, а основная мода подавляется. Время, в течение которого необходимо воздействие внешнего сигнала, быстро уменьшается с ростом его амплитуды.

5. Для ЛБВ средней мощности со спиральной ЗС диапазона 8-12 ГГц, разработанной в АО «НПП Алмаз» был проведен расчет основных параметров, входящих в нестационарную модель. Была получена формула для коэффициента усиления ЛБВ в режиме большого пространственного заряда и с учетом распределенного затухания. Максимальное удельное усиление составляет примерно 8 дБ/см на частоте около 10 ГГц.

Проведено моделирование процессов синхронизации в генераторе на основе подобной ЛБВ. Обнаружено качественное согласие с результатами экспериментального исследования, полученными в работе [22].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыскин Н.М., Балякин А.А., Дмитриева Т.В. и др. Нелинейная динамика распределенных систем. Системы с запаздыванием, вакуумные микроволновые приборы, системы взаимодействующих нелинейных волн. Lambert Academic Publ., 2010. 548 с.
2. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по СВЧ электронике для физиков. В 2 т. Т. 1. М.: Физматлит, 2003.
3. Электронные приборы сверхвысоких частот / Под ред. В.Н. Шевчика и М.А. Григорьева. Саратов, Изд-во Саратов. ун-та. 1980.
4. Анисимова Ю.В., Воронцов Г.М., Залогин Н.Н., Кислов В.Я., Мясин Е.А. Шумотрон // Радиотехника. 2000. № 2. С. 19-25.

5. Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J. Vacuum electronic high power terahertz sources // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1. No. 1. P. 54-75.
6. Han S.T., Jang K.H., So J.K., Kim J.I., Shin Y.M., Ryskin N.M., Chang S.S., Park G.S. Low-voltage operation of Ka-band folded waveguide traveling-wave tube // *IEEE Trans. Plasma Science.* 2004. Vol. 32, No. 1. P. 60-66.
7. Han S.T., So J.K., Jang K.H., Shin Y.M., Kim J.H., Chang S.S., Ryskin N.M., Park G.S. Investigations for a micro-fabricated folded waveguide traveling-wave tube oscillator // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2005. Vol. 51, No. 5. P. 702-708.
8. Tucek J., Gallagher D., Kreischer K., Mihailovich R. A compact, high power, 0.65 THz source // 2008 IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC'08). Monterey, CA, USA. April 22-24, 2008. P. 16-17.
9. Marchewka C., Larsen P., Booske J., Sengle S., Ryskin N., Titov V. Generation of chaotic radiation in a driven travelling wave tube amplifier with time-delayed feedback // *Phys. Plasmas.* 2006. Vol. 13, No. 1. 013104.
10. Larsen P.B., Earley L.M., Carlsten B.E., Wheat R.M., Booske J.H. Secure chaos communications using driven traveling wave tube amplifiers with delayed feedback // 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC/IVESC'06. Monterey, CA, USA. 2006. P. 521-522.
11. Анисимова Ю.В., Дмитриев А.С., Залогин Н.Н., Калинин В.И., Кислов В.Я., Панас А.И. Об одном механизме перехода к хаосу в системе электронный пучок — электромагнитная волна // *Письма в ЖЭТФ.* 1983. Т. 37, № 8. С. 387-389.
12. Ryskin N.M., Titov V.N., Han S.T., So J.K., Jang K.H., Kang Y.B., Park G.S. Nonstationary behavior in a delayed feedback travelling wave tube folded waveguide oscillator // *Phys. Plasmas.* 2004. Vol. 11, No. 3. P. 1194-1202.
13. Рыскин Н.М. Исследование нелинейной динамики ЛБВ-генератора с запаздывающей обратной связью // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2004. Т. 47, № 2. С. 129-142.

14. Xiao R.Z., Chen C.H., Song W., Zhang X.W., Sun J., Song Z.M., Zhang L.J., Zhang L.G. RF phase control in a high-power high-efficiency klystron-like relativistic backward wave oscillator // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. 013301.
15. Teng Y., Song W., Sun J., Xiao R., Song Z., Zhang L., Zhang Z., Zhang L., Zhang Y., Li J., Fang J. Phase locking of high power relativistic backward wave oscillator using priming effect // J. Appl. Phys. 2012. Vol. 111, 043303.
16. Song W., Teng Y., Zhang Z.Q., Li J.W., Sun J., Chen C.H., Zhang L.J. Rapid startup in relativistic backward wave oscillator by injecting external backward signal // Phys. Plasmas. 2012. Vol. 19, 083105.
17. Абубакиров Э.Б., Денисенко А.Н., Конюшков А.П., Солуянов Е.И., Ястребов В.В. Особенности работы релятивистской лампы обратной волны под воздействием внешнего электромагнитного сигнала // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 5. С. 413-419.
18. Fuks M.I., Schamiloglu E., Li Y.-D. RF priming for operation of relativistic TWT with reflections near cyclotron resonance // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42. No. 1. P. 38-41.
19. Liu M., Michel C., Prasad S., Fuks M.I., Schamiloglu E., Liu C.-L. RF mode switching in a relativistic magnetron with diffraction output // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97. 251501.
20. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В., Фокин А.П. Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8-9. С. 709-720.
21. Ryskin N.M., Titov V.N., Umantsiva O.V. Phase locking and mode switching in a backward-wave oscillator with reflections // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. Vol. 44, No. 8. P. 1270-1275.
22. Емельянов В.В., Емельянова Ю.П., Рыскин Н.М. Экспериментальное исследование ЛБВ генератора с внешней обратной связью // Сборник трудов П Всероссийской научной конференции «Проблемы СВЧ электроники». 26-28 октября 2015 г., Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ. С. 132-134.

23. Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. М.: Сов.радио. 1975. 296 с.
24. Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Сов.радио. 1970. 584 с.
25. Гинзбург Н.С., Сергеев А.С. Динамика ЛСЭ с резонаторами произвольной добротности // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 6. С. 133-140.
26. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984.
27. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
28. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания М.: Физматлит, 2005.