

Изв. вузов «ПНД», т. 2, № 5, 1994

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ, ХАОС И СТРУКТУРЫ В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ: ОБЗОР ТЕМАТИЧЕСКОГО ВЫПУСКА

Электроника сверхвысоких частот одной из первых стала нелинейной наукой, а понятия теории колебаний и волн давно вошли в нее. Самым простым примером возникновения и распространения нелинейных волн в электронном потоке служит явление группирования в пространстве, свободном от ВЧ полей (пространстве дрейфа), невзаимодействующих частиц - электронов (кинематическая группировка) [1]. Образование сгустков, в то же время, - простейший пример возникновения структур в электронном потоке. Другой красивый пример самоорганизующейся системы - электронное облако в магнетроне, которое находит себе нужные контуры. Система электронных спиц (электронных язычков) - несомненно динамическая автоструктура¹, хотя граничные условия определяют, по крайней мере, число спиц. Хаос в облаке (его турбулентное состояние), когда внешние поля превышают поля пространственного заряда, можно связать со стохастической неустойчивостью нелинейных колебаний, возникающей при перекрытии нелинейных резонансов [3]. Примерами ансамбля автоструктур могут быть структуры, возникающие в полном электронном потоке, который движется в продольном статическом магнитном поле (см. [4], [1, рис. 7.13], [5, 6]), и цепочка вихрей на нелинейной стадии развития диокотронной неустойчивости в электронном потоке в скрещенных статическом электрическом и магнитном полях [7]. Электронные вихри в скрещенных полях - пример ансамбля с переменным составом: при условиях вычислительного эксперимента, результаты которого изложены в работе [7], сначала образуются три вихря, которые затем соединяются в два и, наконец, - в единственный вихрь.

Примеры интерпретации физических явлений в электронных потоках и в нелинейной системе электронный поток - ВЧ электромагнитное поле с точки зрения современной нелинейной теории колебаний и волн можно продолжить. Однако, в большинстве случаев речь идет именно об интерпретации, а не об использовании быстро развивающегося математического аппарата, скажем, теории нелинейных волновых процессов или теории структур в сверхвысокочастотной электронике². Почему? Ответ следует искать в истории сверхвысокочастотной электроники.

¹ Под автоструктурой здесь понимается локализованное пространственное образование, устойчиво существующее в диссипативных неравновесных средах и не зависящее (в конечных пределах) от граничных и начальных условий [2].

² Исключение составляет широкое использование идей и методов теории детерминированного хаоса в теории СВЧ электронных приборов, свидетельством чему служат многие статьи этого номера.

Вскоре после того, как специалисты в области СВЧ электроники поняли возможность правильного описания явления обгона одних электронов другими для исследования процессов группирования и использовали для этого метод крупных частиц (см., например, [7]), реализуемый на быстродействующих ЭВМ, подход, основанный на нелинейной теории волн, был забыт. Лишь изредка появлялись работы (главным образом, по теории клистрона), где обсуждались нелинейные волны пространственного заряда. В то же время открытие линейных электронных волн (волн пространственного заряда, циклотронных, синхронных и др. волн), разделение их на волны с положительной и отрицательной энергией привело к плодотворной концепции связанных волн в теории СВЧ приборов с длительным взаимодействием электронов с электромагнитными полями (см., например, [1, гл. 10 и библиографический список к главе]).

Бурное развитие в последние десятилетия теории нелинейных волн не прошло бесследно и для СВЧ электроники, доказательством чему может служить работа [8], первоначально прочитанная как лекция на второй (1973) школе по колебаниям и волнам в нелинейных распределенных системах, проходившей в г. Горьком (ныне г. Нижний Новгород). Автор [8], в частности, отмечает, что «недостатки метода крупных частиц связаны с самим существом метода: представляя электронный поток совокупностью крупных частиц, мы, по существу, вводим коллективные переменные, не соответствующие происходящим в пучке волновым процессам». И далее: «Здесь будет изложен другой подход к исследованию сильно нелинейных процессов в электронных потоках, основанный на разложении по сильно нелинейным (опрокидывающимся) волнам». Работа [8] во многом демонстрировала лишь связь между двумя, казалось бы, альтернативными подходами к рассмотрению электронного потока, но в ней не использовались новые представления и новые методы, развитые в нелинейной теории волн.

По-видимому, первым, кто попытался изучать новые нелинейные феномены - солитоны - в электронных СВЧ приборах, стал Джерри Томас (см., например, Thomas G.E. // *Int. J. Electronics*. 1984. Vol. 57, № 6. P.871-886.). Д. Томас заменяет реальный объект (будь то магнетрон или gyro-LBВ) моделью, в которой электронный поток представляется безграничной плазменной средой. Стандартная процедура, известная при получении эволюционных уравнений [9], после применения ее к уравнениям такой среды и к уравнениям Максвелла приводит к модифицированному уравнению Шредингера, имеющего солитонные решения. Существует ряд работ, относящихся к теории приборов типа O, в которых описаны солитоны, соответствующие уравнению Кортевега - де Вриза. Обзору таких «солитонных» работ посвящена статья [10]. Подобная идеология сведения задачи к эталонным уравнениям теории нелинейных волн развита и в работе [6]. Разумеется, при сведении задачи к эталонным уравнениям всегда остается вопрос о пределах применимости полученного результата. Часто подобные решения имеют место в таком диапазоне изменения рабочих параметров, где реальные приборы СВЧ не используются. Поэтому особую важность приобретает вычислительный эксперимент в рамках модели, описываемый исходными уравнениями (одна из таких попыток применительно к магнетрону была предпринята тем же Д. Томасом и описана в обзоре [5]).

В указанном выше смысле в этом специальном выпуске журнала (№№ 5 и 6, 1994), посвященном нелинейным волнам, обращают на себя внимание три статьи Н.М. Рыскина. В первой работе (№ 5) приведены точные решения для уединенных волн пространственного заряда в одномерном цилиндрическом электронном потоке, движущемся в сильном продольном магнитном поле, а также определены условия их устойчивости. В вычислительном эксперименте автор исследовал процессы возбуждения и взаимодействия этих волн, что позволило ему сделать выводы о степени применимости использовавшихся другими авторами модельных уравнений. В частности, показано, что столкновение двух быстрых и двух медленных волн с высокой степенью точности можно считать упругим. При столкновении же быстрой и медленной волн образуется «осциллирующий хвост»,

что представляет собой проявление неупругих эффектов. Во второй (№ 5) и третьей (№ 6) статьях, посвященных анализу модуляционной неустойчивости волн пространственного заряда, впервые показано, что взаимодействие волн приводит к неустойчивости практически при любом значении частоты несущей волны.

Большая часть статей выпуска посвящена сложной динамике различных СВЧ автогенераторов. Следует заметить, что автогенераторы хаотических колебаний появились еще в «достохастический период», когда никто не осмелился бы даже говорить о детерминированном хаосе в динамических системах. В шестидесятых годах был предложен и начал изучаться ЛБВ-генератор с запаздывающей обратной связью - шумотрон [11]. Роль шумотрона как экспериментальной модели, на которой проверялись все теоретические новинки, полученные при изучении хаоса в простых системах, трудно переоценить.

После того, как широкие круги физиков познакомились с работами по стохастической неустойчивости нелинейных колебаний и со статьями о странном аттракторе, хаос стали искать и находить везде, в том числе и в распределенных автоколебательных системах вакуумной нерелятивистской и релятивистской СВЧ электроники - таких, как лампа обратной волны (карсинотрон), оротрон, гиро-лампа со встречной волной, лазер на свободных электронах и т.д. Подробный обзор результатов исследований динамического хаоса в электронных СВЧ приборах, основанный на данных отечественной и зарубежной печати за 1965-1990 годы, содержится в работах [12-14].

По-видимому, самой простой электронной моделью со сложной динамикой можно назвать диод Пирса (см., например, [15]). В простейшей модели диода одномерный моноскоростной электронный поток с постоянной плотностью пространственного заряда, нейтрализованного ионным фоном, движется между заземленными электродами. Единственным бифуркационным параметром задачи является $\alpha = (\omega_p L) / v_0$ - невозмущенный угол пролета электронов по плазменной частоте ω_p (v_0 - скорость на входе в диод, L - расстояние между электродами). Бифуркации, происходящие при изменении α , приводят, в частности, к возникновению хаотического аттрактора по сценарию Фейгенбаума вблизи $\alpha = 3\pi$. При дальнейшем изменении сам аттрактор претерпевает кризисы. Важно, хаотические колебания возникают в диоде до образования виртуального катода, что позволяет говорить о диоде как эталонной модели возникновения «электронной турбулентности».

В статье В.Г. Анфиногентова (№ 5) сделан следующий шаг в исследовании сложной динамики диода Пирса - изучены нелинейные колебания в электронном потоке с виртуальным катодом. С физической точки зрения интересен отмеченный в работе факт появления вторичного виртуального катода и обнаруженный автором новый механизм возникновения в диоде хаотической динамики, связанный с нелинейным взаимодействием виртуальных катодов.

Нелинейная динамика виртуального катода в триодных системах рассмотрена в работе известных исследователей виркаторных приборов А.П. Привезенцева и Г.П. Фоменко (№ 5). Пожалуй, самое интересное в работе проявление хаоса и порядка в одной системе и их взаимная трансформация.

В экспериментах часто встречаются ситуации, когда хаотические пульсации возникают на фоне гармонических колебаний, то есть имеет место хаотическая модуляция. Режим хаотической модуляции может возникнуть в автономной волновой системе в результате развития собственной неустойчивости. Примером такой системы может служить лампа обратной волны (ЛОВ). В этом электронном генераторе наблюдался переход к режиму колебаний с хаотической модуляцией (см., например, [16]). В экспериментах с ЛОВ изменялись параметры замедляющей системы, электронного пучка, питания и т.д., и было обнаружено, что характер переходов по пути к хаотической модуляции качественно не меняется и в различных вариантах эксперимента определяется единственным параметром $L = \beta \{I_0 K / 4V_0\}^{1/3}$, где β - волновое число волны, синхронной с пучком, l - длина пространства взаимодействия, $\{I_0 K / 4V_0\}^{1/3} = C$ - параметр усиления Пирса, I_0 - постоянная составляющая пучка, V_0 - ускоряющее напряжение, K - сопротивление связи. Такое подобие свидетельствует о том, что флуктуации (в

частности, шумы электронного пучка) не принципиальны для возникновения хаотического режима в ЛОВ. Последовательность бифуркаций, наблюдаемых в этой системе по пути к режиму хаотической модуляции (при увеличении параметра L), была такой: одночастотные - многочастотные - хаотические колебания.

Лампа обратной волны была исследована теоретически и экспериментально во многих работах и стала своеобразной эталонной моделью распределенных автоколебательных систем со сложной динамикой.

В обзоре Д.И. Трубецкова, А.П. Четверикова (№ 5) сделана попытка рассмотреть автоколебания в распределенных системах электронный поток - встречная (обратная) волна не глазами специалиста по электронике, а с позиций современной нелинейной динамики. С единой точки зрения рассматриваются не только различные модификации ламп обратной волны, но и лампа с поперечным полем, лампа на аномальном доплеровском эффекте, gyro-лампа со встречной волной, пениотрон и другие. В отдельной статье А.П. Четверикова (№ 5) изложены оригинальные результаты исследования нелинейной динамики электронных систем с силовой группировкой.

Сверхвысокочастотные устройства твердотельной СВЧ электроники представлены работой Д.А. Усанова, С.Б. Венига, С.С. Горбатова и А.А. Семенова (№ 5), в которой изложены результаты исследований генераторов на диодах Ганна. Теоретическое описание подобных устройств сложнее, чем описание вакуумных генераторов, поскольку на нелинейные свойства импеданса диодов Ганна влияют режим питания, конструктивные исполнения элементов, тип электродинамической системы, в которую помещен диод, выбранный частотный диапазон и другие факторы. Поэтому принципиальную роль для теории играет правильный выбор эквивалентной схемы генератора и ее математическое описание, а также непрерывный экспериментальный контроль выбранной модели. Описан ряд новых результатов. В частности, экспериментально обнаружен и исследован эффект синхронизации мод при воздействии на генератор внешним сигналом на частоте субгармоники высокой кратности одной из составляющих спектра. Приведены результаты, свидетельствующие о возможности возникновения хаотических колебаний при напряжениях смещения, в несколько раз превышающих пороговое.

Колличество работ, в которых исследуется нелинейная динамика лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), уже трудно сосчитать. Они весьма разноплановые в подходах и интерпретациях, поскольку ищут их не только (а может быть, не столько) специалисты по электронике, но и исследователи в области физики плазмы, квантовой электроники, оптики и др. Конечно, у ЛСЭ много общего в динамике с резонансной ЛБВ или лампой обратной волны. В частности, в ЛСЭ имеют место сценарии перехода к хаосу такие же, как в упомянутых устройствах. Однако, существуют и режимы, в которых возникновение стохастической неустойчивости объясняется механизмом перекрытия нелинейных резонансов: нескольким резонансам перекрытия соответствуют несколько потенциальных «ям», в которых колеблются электроны; при перекрытии резонансов происходит сближение «ям», и система может переходить из «ямы» в «яму» непредсказуемым образом. С такой неустойчивостью связаны паразитные явления в ЛСЭ.

В журнале № 6 нелинейной динамике ЛСЭ посвящены три работы представителей нижегородской школы физиков. Статья В.Л. Братмана и А.В. Савилова посвящена изложению результатов исследования сценария перехода к многочастотному режиму ЛСЭ-генератора, в котором электронный поток взаимодействует с синхронной попутной электромагнитной волной, многократно отражаемой зеркалами в пространстве взаимодействия. В рамках простой двухмодовой модели при малой надпороговости (не сильно превышающей критическую) подробно описан процесс конкуренции продольных мод.

В статье Н. С. Гинзбурга, Н.Ю. Пескова и А.С. Сергеева теоретически обсуждается концепция получения сверхмощного когерентного излучения миллиметрового диапазона, альтернативная методу антенных фазированных решеток с большим числом синхронизированных генераторов средней мощности. В основе концепции лежит идея использования двумерной распределенной

обратной связи в ЛСЭ. Исследован процесс установления колебаний и пространственной синхронизации излучения в таком ЛСЭ.

Третья статья носит обзорный характер и посвящена изложению результатов исследования конкуренции мод, их взаимной синхронизации, периодической и стохастической конкуренции мод, их взаимной синхронизации, периодической автомодуляции, некогерентной накачке в ЛСЭ и т.п. Обзор вполне может претендовать на название «Почти все о современной теории ЛСЭ». Замечу, что три автора этого номера - В.Л. Братман, Н. С. Гинзбург, М.И. Петелин - создали первую теорию ЛСЭ, основанную на концепции комбинированной волны еще в 1978 году, что позволило описывать различные конфигурации ЛСЭ с единой точки зрения (Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Петелин М.И. Энергетические возможности релятивистского комптоновского лазера // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28. С. 207-211). Применительно к модели ЛСЭ, рассмотренной в указанной работе и схематически представленной на рисунке, суть концепции в следующем.

В инерционной системе отсчета, которая следует поступательно в направлении движения электронного потока (в положительном направлении оси x) со скоростью, равной фазовой скорости комбинационной волны $v_{\phi} = \Omega/k_x = (\omega_c - \omega_n)/(k_c \cos \varphi_c + k_n \cos \varphi_n)$, поле E двух волн воздействующих на пучок является одночастотным: $E' = \text{Re}\{\hat{E}(r)\exp(i\omega t)\}$. Тогда в выбранной системе координат усредненное движение электрона, скорость которого $v' \ll c$, определяется силой Миллера (М.А. Миллер. Движение заряженных частиц в высокочастотных электромагнитных полях // Изв. Вузов. Сер. Радиофизика. 1958. Т.1. С. 166.)

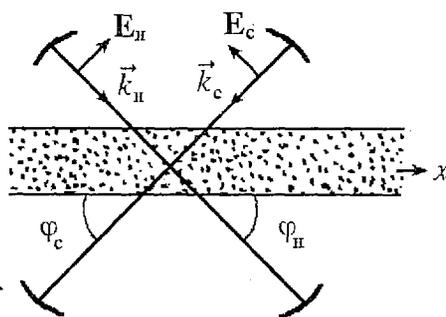


Рис. Схема модели ЛСЭ, в которой на электронный поток действует поле двух электромагнитных волн $E = \text{Re}\{E_n \exp[i(\omega_n t - k_n r)] + E_c \exp[i(\omega_c t - k_c r)]\}$, индексы «н» и «с» относятся к полю накачки и сигнала соответственно

$$F' = -[e^2/(4m\omega^2)]\nabla^2 |E|^2,$$

e и m - заряд и масса электрона. Эта сила при постоянных E_n и E_c

определяется только комбинационной волной; выражение для F' приведено для случая отсутствия фокусирующих электроны полей.

При таком подходе физические процессы в ЛСЭ можно интерпретировать как излучение частиц при условии их пространственного резонанса с волновыми биениями: $v \approx v_{\phi} \approx (\omega_c - \omega_n)/\alpha_x$, $\alpha_x = k_c - k_n$ (v - скорость электронов). В простейшем случае теория ЛСЭ становится аналогичной теории ЛБВ с заменой высокочастотного электрического поля в ЛБВ на эффективное поле комбинационной волны.

Дебютирует в выпуске (№ 5) студентка 5 курса физического факультета Саратовского университета Н.О. Бессуднова с работой, посвященной нелинейной теории электростатических волн в кольцах Сатурна.

Выше была упомянута сила Миллера, и это не случайно: «изюминка» выпуска (№ 5 и № 6), и его украшение - две лекции на летних физматшколах Михаила Адольфовича Миллера, известного специалиста в области электродинамики, яркого, разносторонне одаренного человека. Лекции не стоит анонсировать - их нужно читать.

Начиная с этого выпуска, в журнале появляется еще один раздел - «Новое в современной прикладной физике». Он представлен статьей В.И. Пономаренко и Д.И. Трубецкова (№ 6), обсуждающей одну из проблем вакуумной микроэлектроники, а именно: создание автогенератора на вакуумном микротриоде. В ней изложены результаты вычислительного и аналогового

радиотехнического экспериментов с возможным вариантом автогенератора.

Несомненно, читателя заинтересуют материалы из книги «Красота фракталов».

Библиографический список

1. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984 (второе издание - 1992).

2. Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. Автоструктуры. Хаотическая динамика ансамблей // Нелинейные волны. Структуры и бифуркации. М.: Наука, 1987. С. 7.

3. Заславский Г.М., Чириков Б.В. Стохастическая неустойчивость нелинейных колебаний // УФН. 1971. Т. 105. С. 7.

4. Kuhl R.L., Webster H.R. Breakup of hollow cylindrical electron beams // IRE Trans. 1956. Vol. ED-3. P. 172.

5. Трубецков Д.И., Шепелева Е.Я. Структуры (общий взгляд и задачи электроники) // Проблемы физической электроники. Л.: Издание ФТИ. 1988. С. 124.

6. Соколов Д.В., Трубецков Д.И. Нелинейные волны, динамический хаос и некоторые задачи сверхвысокочастотной электроники // Проблемы физической электроники. Л.: Изд-ние ФТИ. 1986. С. 141.

7. Фернбах С., Ротенберг М. Вычислительные методы в физике плазмы. М.: Мир, 1984. С. 204.

8. Солнцев В.А. Нелинейные волны в электронных потоках // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1974. Т. 17, №4. С. 616.

9. Пелиновский Е.Н., Фридман В.Е., Энгельбрехт Ю.К. Нелинейные эволюционные уравнения. Таллинн: Валгус, 1984

10. Рыскин Н.М., Трубецков Д.И. Нелинейные электронные волны. Методы и результаты для приборов М-типа // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, вып. 2. С. 193.

11. Кислов В.Я. Теоретический анализ шумоподобных колебаний в электронно-волновых системах и автогенераторах с запаздыванием // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (5-ая зимняя школа-семинар инженеров). Кн. 5. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1981. С. 78.

12. Афанасьева В.В., Трубецков Д.И. Динамический хаос в сверхвысокочастотных релятивистских электронных устройствах // Проблемы физической электроники. Л.: Издание ФТИ. 1990. С. 115.

13. Афанасьева В.В., Трубецков Д.И. Динамический хаос в электронных сверхвысокочастотных приборах. Часть I. Вакуумные нерелятивистские приборы. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. Вып. 3. (1615). М.: ЦНИИ «Электроника», 1991. С. 31.

14. Афанасьева В.В., Трубецков Д.И. Динамический хаос в электронных сверхвысокочастотных приборах. Часть II. Приборы релятивистской электроники. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. Вып. 4 (1615). М.: ЦНИИ «Электроника», 1991. С. 32.

15. Анфиногентов В.Г., Трубецков Д.И. Хаотические колебания в гидродинамической модели диода Пирса // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, № 12. С. 2251.

16. Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И. Экспериментальное наблюдение стохастических автоколебаний в динамической системе электронный пучок - обратная электромагнитная волна // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29, вып. 3. С. 180.

Редактор выпуска чл.-корр. РАН, профессор

Д.И. Трубецков