



**ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИСТОЧНИКОМ ХАОСА –
РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ С КВАДРАТИЧНЫМ
ФАЗОВЫМ МОДУЛЯТОРОМ И ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ
УСИЛЕНИЕМ КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА**

И.В. Измайлов, Б.Н. Пойзнер

Экспериментально реализован модифицированный радиоэлектронный аналог нелинейного кольцевого интерферометра. Устройство представляет особый класс источников колебаний или волн, чей принцип действия основан на интерференционном усилении сигнала обратной связи входным сигналом. Проведены лабораторные эксперименты, показано сходство их результатов с данными численного моделирования. Обнаружены перемежаемость, хаотические, регулярные, статические режимы. Выдвинут тезис об управляемой нелинейности динамических систем.

Ключевые слова: Интерференционное усиление, запаздывающая обратная связь, бифуркация, хаос, перемежаемость, статическое состояние, управляемая нелинейность.

Введение

В предыдущей статье авторов [1] были предложены структурные схемы и математические модели устройств, принцип действия которых основан на интерференционном усилении сигнала обратной связи входным сигналом. Одно из устройств является радиоэлектронным аналогом кольцевого интерферометра с керровской нелинейностью (то есть системы Икеды [2]), второе – модификацией радиоэлектронного аналога. В ходе компьютерного моделирования процессов в нем обнаружены перемежаемость, хаотические, регулярные, статические режимы. Отметим, что кольцевой интерферометр с керровской нелинейностью и его математическая модель оказываются одним из «эталонных» сюжетов теории хаотических автоколебаний [2–10].

Содержание данной статьи отражает итоги очередного этапа исследований, который предусматривал практическое осуществление модификации радиоэлектронного аналога нелинейного кольцевого интерферометра (НКИ), а затем проведение

цикла лабораторных экспериментов. Их цель – проверить полученные в [1] основные теоретические выводы относительно работоспособности и характеристик этого устройства как специфического источника регулярных и хаотических колебаний или волн.

Очевидно, что возможности численного моделирования несравнимо богаче, чем лабораторного эксперимента. Смонтированное нами радиоэлектронное устройство соответствует математической модели (3) в [1], а по своей структуре – схеме на рис. 2 в [1], но с учетом наличия CR -фильтра между блоками «А» и «А²», как говорилось в [1].

1. Экспериментальное исследование модификации функционального аналога НКИ

В схеме на рис. 2 в [1] генератор (играющий роль источника гармонических колебаний) имеет частоту $\omega = 144$ МГц. Модификация функционального аналога НКИ выполнена с использованием транзисторов и операционных усилителей, а линией задержки служит отрезок коаксиального кабеля (марки RG-6) длиной 200 м. Естественно, меру его (не)соответствия модели задают отклонения свойств реальных блоков установки от расчетных в модели.

Перечислим значения основных параметров устройства и доверительные интервалы при их измерении. Время релаксации τ_n можно изменять в пределах 0.01645...0.141 мкс (погрешность его определения $\pm 7\%$), что соответствует граничным частотам RC -фильтра 9.68...1.13 МГц. Время $\tau_{ФВЧ} = 17$ мкс $\pm 7\%$, что соответствует граничной частоте CR -фильтра 9.32 кГц. Отношение этих времен $\tau_{ФВЧ}/\tau_n = 1038...121.1$. Время запаздывания в кабеле t_e имеет порядок 1 мкс (тогда относительное запаздывание $t_e/\tau_n = 60.79...7.09$). Значения коэффициента нелинейности K_a можно изменять в пределах 0...632 рад (погрешность его определения $\pm 15\%$). Минимальная величина $\gamma \equiv 2\gamma_a = 0.239$ ($\pm 5\%$), а максимальная -0.395 ($\pm 5.4\%$). Фазовая задержка в контуре обратной связи $\omega t_e = 72.2^\circ \pm 6^\circ$. Модулятор обеспечивает сдвиг фаз θ от 0 до, по крайней мере, величины 1.47π (но не может превышать 2π). В дальнейших экспериментах значение $\tau_n = 0.01645$ мкс ($f_{гр\ n} = 9.68$ МГц, $\tau_{ФВЧ}/\tau_n = 1038$, $t_e/\tau_n = 60.79$), $\gamma_a = 0.1635$.

В динамическом диапазоне работы фазовращателя (по входу управления) характеристика перемножителя выражается зависимостью: $U_{\text{вых}} = 72.54\text{В}^{-1}(\pm 10\%)U_{\text{вх}}^2 - 2.23(\pm 18\%)U_{\text{вх}} + 0.034(\pm 7.6\%)$ В со средней погрешностью 1.3 мВ. Присутствие линейного слагаемого обуславливает наличие соответствующего («линейного») коэффициента K_l нелинейности, отражающего вклад этого слагаемого в величину фазового набегу θ : $|K_l| \leq |-42.5|$ рад ($\pm 20\%$). В электрооптике коэффициент K_l называли бы «покельсовским». Но оказывается, что он достаточно мал по сравнению с «керровским» коэффициентом K : $|K_l|/K \approx 0.067$.

Эксперимент, как и численное моделирование в [1], демонстрирует устойчивость статического состояния: $\theta = 0$, $U_c = A$ даже при максимальных значениях K . Поэтому нередко после включения электропитания установки для получения динамических режимов требуется внести возмущение, скажем, прикоснуться к некоторым узлам радиоэлектронной схемы.

Перейдем к описанию и анализу экспериментальных данных. Сигналы зарегистрированы цифровым осциллографом (Le Croy 62XS), затем обработаны в цифровой форме (отфильтрованы виртуальным RC -фильтром с частотой среза 6 МГц), построены временные реализации и фазовые портреты переменной составляющей A_{\sim} амплитуды A . При построении временных реализаций время t измеряется относительно некоторого условного момента t_0 (начала отсчета времени), меняющегося от реализации к реализации.

Рис. 1 и 2 демонстрируют закономерность получения (квази)периодических сигналов в реализованном устройстве при высоких значениях коэффициента нелинейности K_a : 616 и 530. На них и далее – при наличии градаций серого цвета – более темные участки соответствуют более длительному пребыванию системы в окрестности данной точки (в фазовом пространстве). В момент своего возникновения сигналы A_{\sim} имеют один характерный вид (рис. 1, a и z , 2, b), а далее – через последователь-

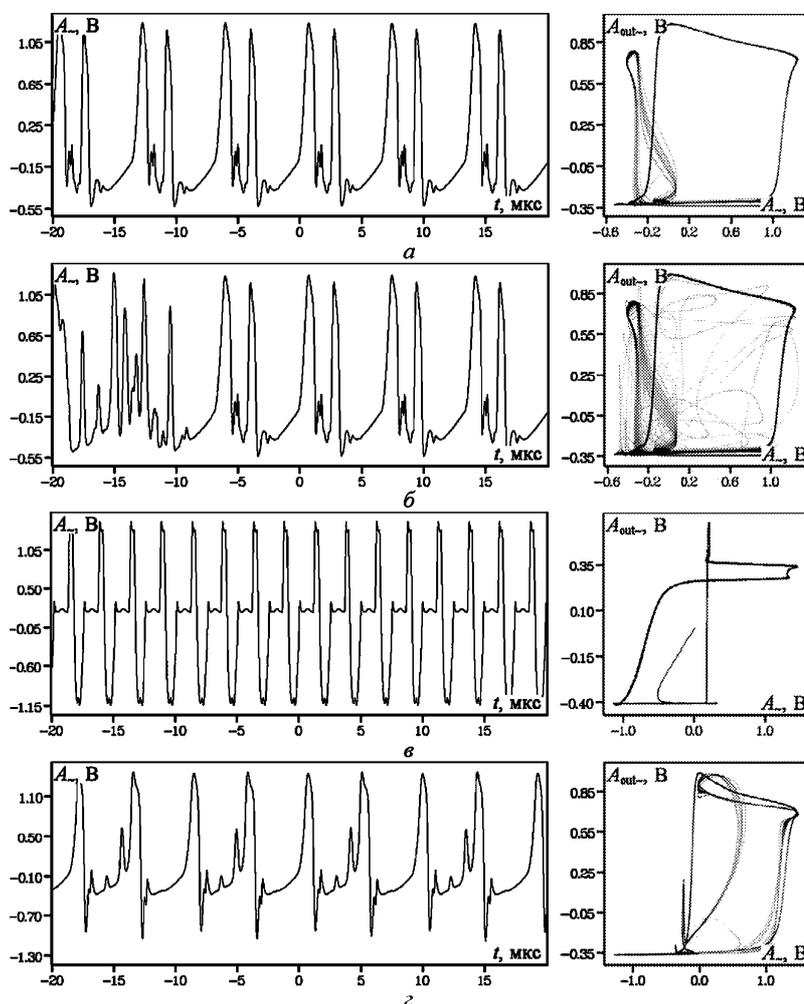


Рис. 1. Квазирегулярная динамика переменной составляющей A_{\sim} амплитуды A при $K_a = 616$ в разные периоды времени, отстоящие друг от друга на величины: $t_{0\delta} - t_{0a} = 13$ с, $t_{0z} - t_{0\delta} = 414$ с (6.9 мин) при первом включении (a - $в$) и спустя 75 с после повторного включения питания установки (z)

ность «сбоев» ритма (рис. 1, б, 2, а) – они преобразуются к своему финальному виду (рис. 1, в, 2, в). Переход к финальному периодическому режиму занимает весьма длительный промежуток времени, около 1 мин. В единицах времени «полного» установления процесса ($3 \cdot \tau_{ФВЧ} + t_e$) это составляет около $3.3 \cdot 10^6$.

Нетривиальная динамика в устройстве начинается при уменьшении коэффициента нелинейности до уровня $K_a = 241$ и менее (рис. 3 и 4). На увеличенных фрагментах (рис. 3, в и 4, в) нетрудно различить практически инвариантные малые участки временных реализаций.

Дальнейшее снижение значения K_a до величины 213 делает возможным возникновение режима перемежаемости (рис. 5–8). Структуру хаотических, ламинарных и квазипериодических стадий перемежаемости, а также переходы между ними иллюстрируют рис. 6, 7, в, 8, г. Увеличенный фрагмент начальной стадии разрушения квазипериодического процесса (рис. 7, в) выглядит как явление удвоения периода, а далее – возникновения 4-цикла. Динамика, подобная той, что на рис. 5–8, сохраняется еще не менее 3 минут после стадии, представленной на рис. 8.

Дальнейшее уменьшение K_a до значения 179 (рис. 9) приводит к перемежаемости, в составе которой не обнаруживаются квазипериодические стадии, а есть только хаотические и ламинарные. Пропорции между временами существования последних изменяются во времени.

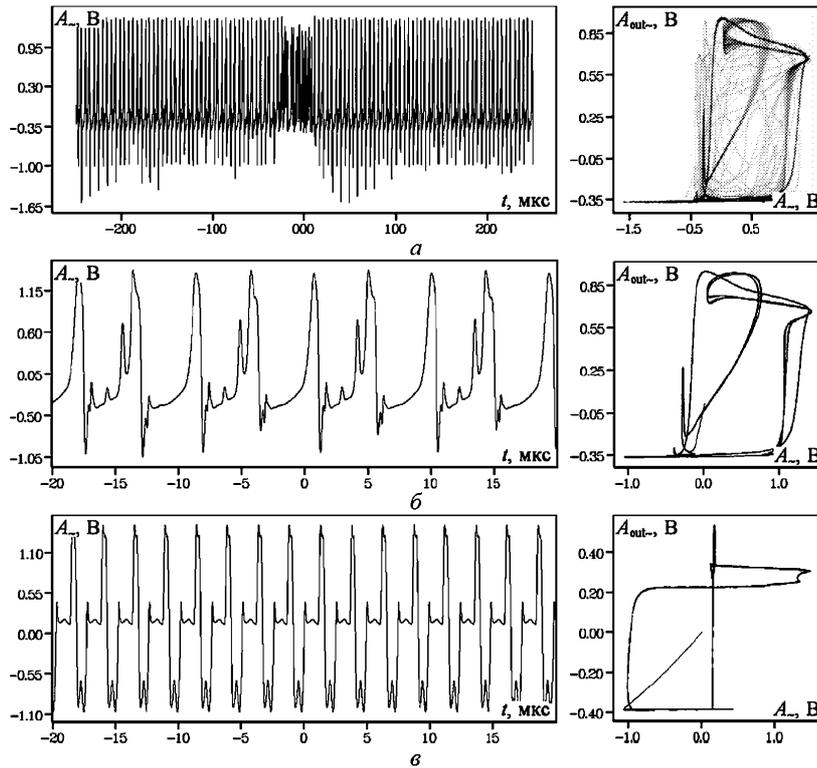


Рис. 2. Динамика переменной составляющей A_{\sim} амплитуды A при $K_a = 530$ в разные периоды времени: $t_{0\delta} - t_{0a} = 15$ с для первого включения (а, б) и спустя приблизительно 2 минуты после повторного включения (в)

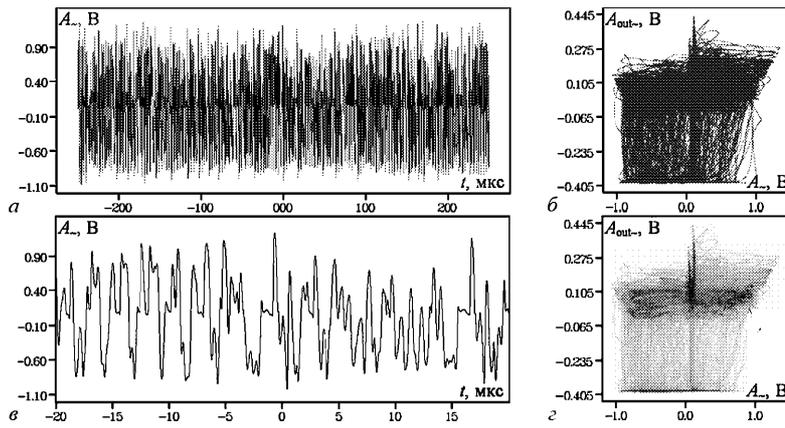


Рис. 3. Хаотическая динамика переменной составляющей A_{\sim} амплитуды при $K_a = 241$ в период времени, отстоящий от момента включения не менее чем на 3 мин. На рис. в – увеличенный фрагмент рис. а. Фазовый портрет (б) представлен с помощью градаций серого цвета (г) и соответствует интервалу времени рис. а

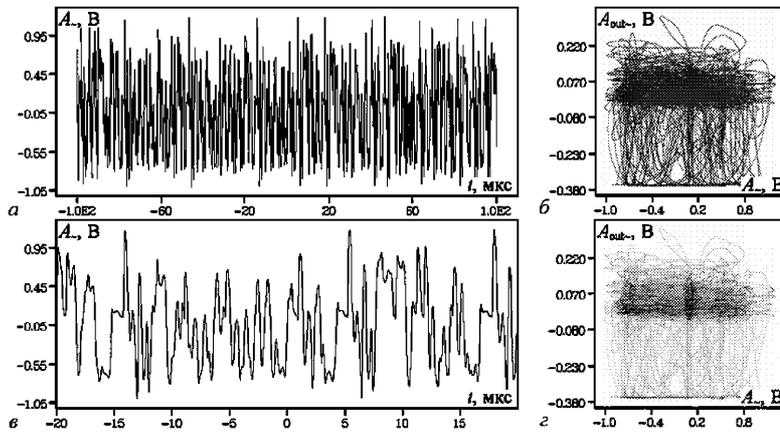


Рис. 4. Хаотическая динамика переменной составляющей амплитуды при $K_a = 235$ в период времени, отстоящий от момента включения не менее чем на 1 мин. На рис. в – увеличенный фрагмент рис. а. Фазовый портрет (б) представлен с помощью градаций серого цвета (г) и соответствует интервалу времени рис. а

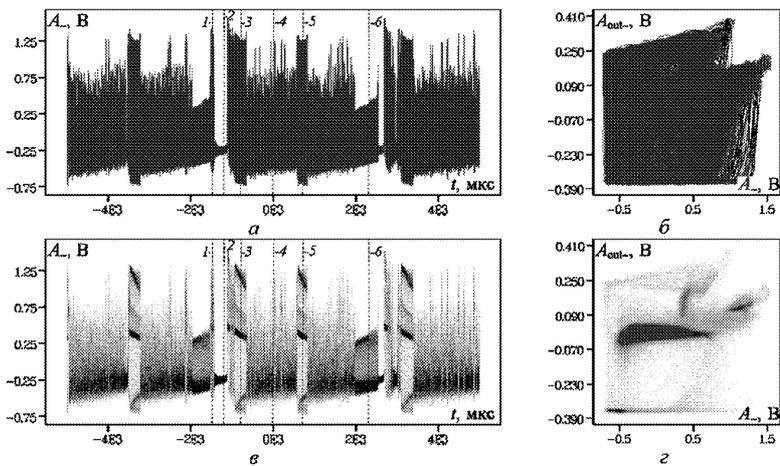


Рис. 5. Переменяемость в динамике переменной составляющей A_{\sim} амплитуды A при $K_a = 213$. На рис. в, г – представлены с помощью градаций серого цвета временная реализация и фазовый портрет, соответствующие рис. а и б

Понижение K_a (до 153) приводит к исчезновению ламинарной фазы, следовательно, и перемежаемости (рис. 10), а также к возможности возврата системы в статическое состояние: $\theta = 0$, $U_c = A$. Но после повторного включения установки хаотическая динамика восстанавливается.

При дальнейшем уменьшении коэффициента нелинейности ($K_a = 137$) не исключено повторение перемежаемости, но без ламинарной стадии (рис. 11, 12), а финалом ее эволюции снова оказывается статическое состояние системы.

При $K_a \leq 49$ в экспериментах не удалось возмутить систему и перевести ее в динамический режим. Вероятно, при этих значениях K_a существует лишь единственный аттрактор: устойчивое статическое состояние, когда $\theta = 0$, $U_c = A$.

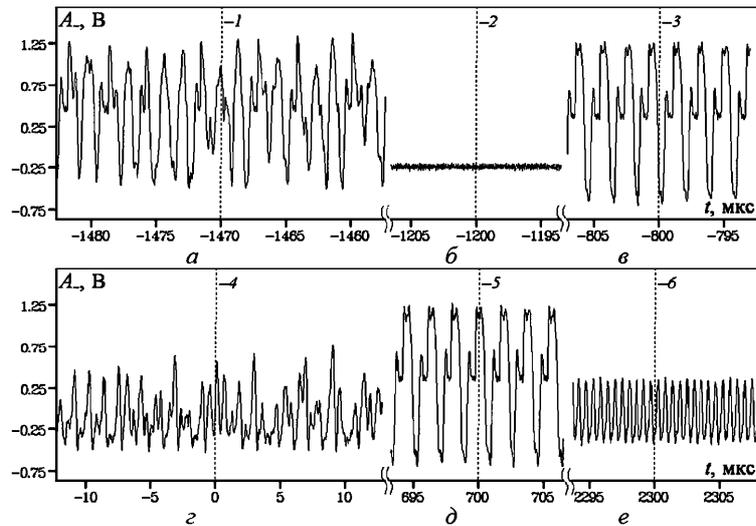


Рис. 6. Увеличенные фрагменты временных реализаций на рис. 5 ($K_a = 213$) в окрестностях точек, обозначенных вертикальными нумерованными пунктирами: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е)

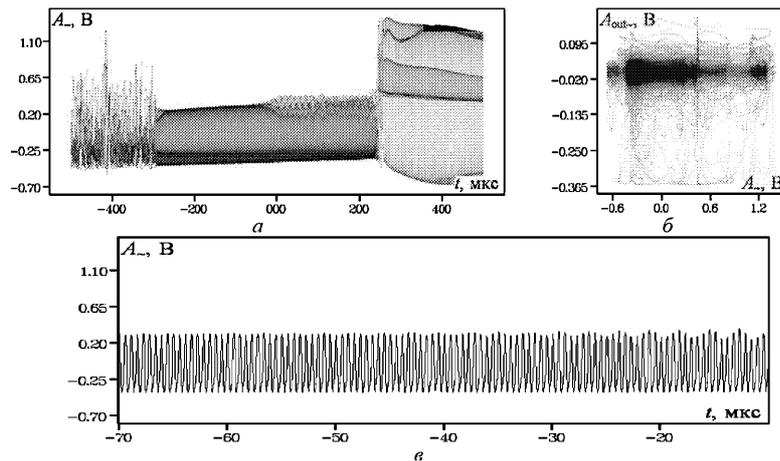


Рис. 7. Временная реализация переменной составляющей амплитуды с продолжительным квазипериодическим режимом (а), соответствующий ей фазовый портрет (б) и увеличенный фрагмент начальной стадии разрушения квазипериодического процесса (в) при $K_a = 213$. Этот период времени отстоит на интервал $t_{0 \text{ рис. 7}} - t_{0 \text{ рис. 5}} = 53$ с от периода рис. 5

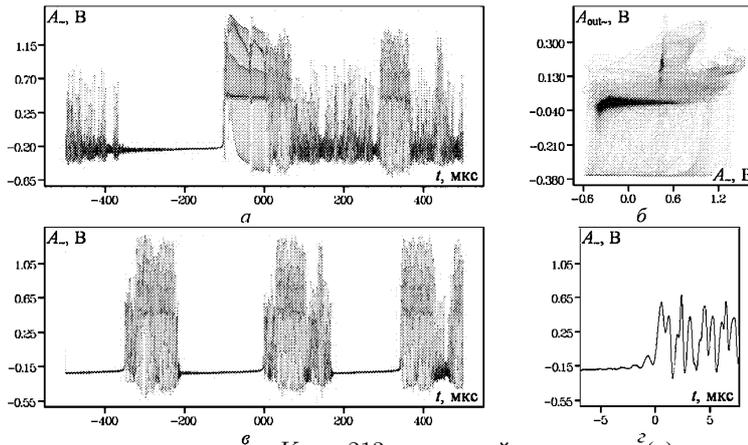


Рис. 8. Эволюция перемежаемости при $K_a = 213$: временной реализации (а) соответствует фазовый портрет (б); последующий этап (в) и его детализация (з). Эти периоды времени отстоят от периода рис. 5 на интервалы t_0 рис. 8, а - t_0 рис. 5 = 62 с и t_0 рис. 8, в - t_0 рис. 5 = 76 с. Подобный характер динамики сохраняется еще не менее 3 мин.

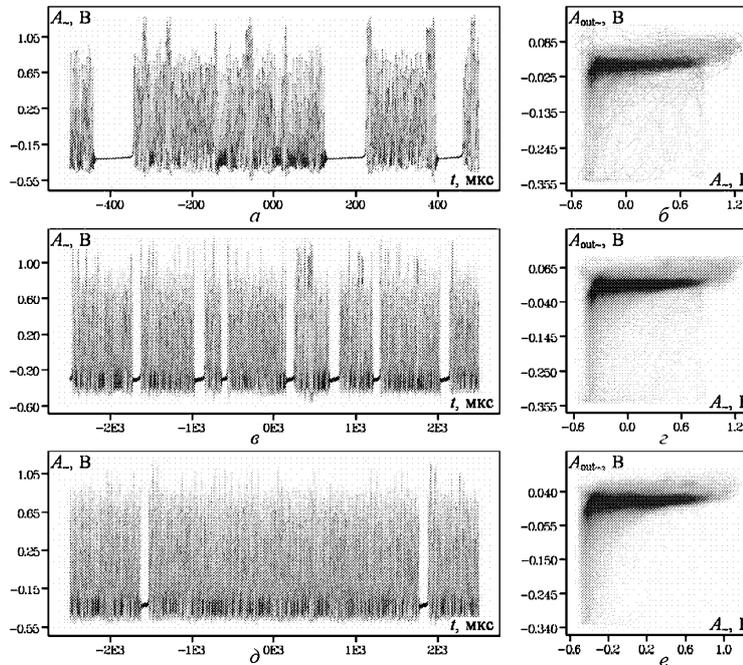


Рис. 9. Перемежаемость при $K_a = 179$, демонстрирующая различные пропорции ламинарной и хаотической стадии. Временные реализации (а, в, д) и фазовые портреты (б, з, е) относятся к периодам времени, отстоящим друг от друга на интервалы: $t_0 в - t_0 а = 11$ с и $t_0 д - t_0 в = 75$ с

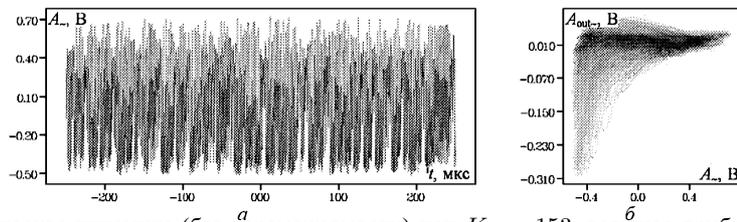


Рис. 10. Хаотическая динамика (без перемежаемости) при $K_a = 153$, ведущая приблизительно через 1 мин. к возвращению системы в статическое состояние. После повторного включения хаотическая динамика восстанавливается

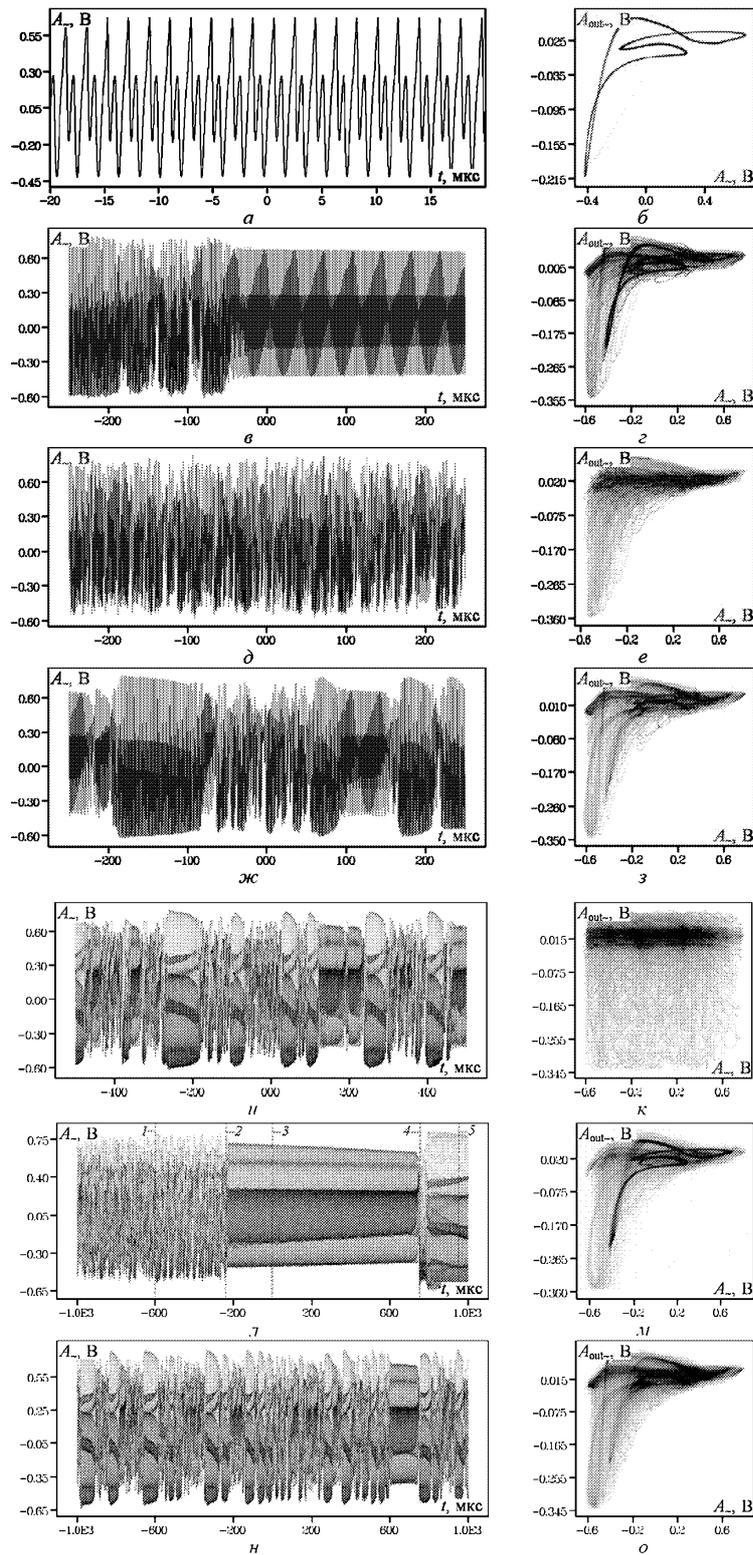


Рис. 11. Переमेжаемость при $K_a = 137$, ведущая приблизительно через 2.9 мин. к возвращению системы в статическое состояние. Регулярный процесс, формирующийся вслед за включением питания (а), и его фазовый портрет (б). Смена типов сложного поведения (в-о) в разные периоды времени, отстоящие друг от друга на величины: $t_{0 в} - t_{0 а} = 9$ с, $t_{0 д} - t_{0 в} = 8$ с, $t_{0 ж} - t_{0 д} = 8$ с, $t_{0 и} - t_{0 ж} = 70$ с, $t_{0 л} - t_{0 и} = 38$ с, $t_{0 н} - t_{0 л} = 28$ с

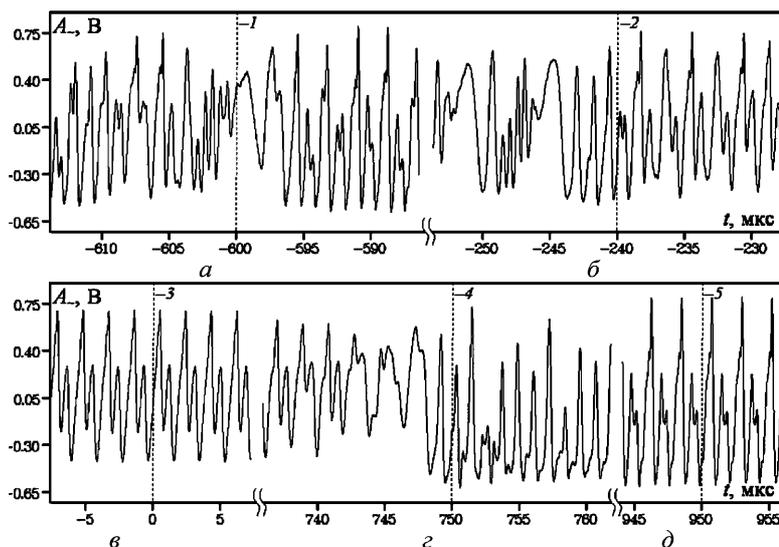


Рис. 12. Увеличенные фрагменты временных реализаций на рис. 11, l ($K_a = 137$) в окрестностях точек, обозначенных вертикальными нумерованными пунктирами: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д)

Кажется парадоксальным отсутствие хаотической динамики при больших значениях коэффициента нелинейности ($K_a = 616$, $K_a = 530$) и ее возникновение лишь при уменьшении его до $K_a \approx 241$. Это противоречие снимается, если вспомнить о явлении *ограничения* (или *насыщения*) *нелинейности* [7; 10, с. 52, 162–163]. В нашем случае (устройстве) оно обусловлено ограниченным динамическим диапазоном фазового модулятора по входу управления. Значения K_a , приводимые в работе, – это уровень нелинейности в режиме малого сигнала, точнее, в режиме малых величин переменной составляющей A_{\sim} амплитуды несущего колебания (малых глубин модуляции несущего колебания). Высокие значения K_a провоцируют систему к более глубокой модуляции, что выводит сигнал управления фазового модулятора за границы его динамического диапазона. А реализуется ли это ограничение, зависит не только от K_a , но и от самого динамического режима, который возник бы в «идеальной» системе, то есть без ограничения нелинейности. Степень реального результирующего влияния его в принципе можно оценить длительностью пребывания системы за границами динамического диапазона.

Заключение

Систематизированы экспериментальные данные о поведении переменной составляющей амплитуды огибающей высокочастотного сигнала в модифицированном радиоэлектронном аналоге кольцевого интерферометра с керровской нелинейностью. Они доказывают осуществимость регулярных и хаотических режимов динамики в устройстве, представленном на рис. 2 в [1].

Сравним результаты вычислительных [1] и лабораторных экспериментов. Несмотря на существенное различие параметров виртуальной и реальной систем,

Сопоставление результатов численного моделирования
и лабораторного эксперимента

Моделирование	Эксперимент	Комментарий
Рис. 5 в [1]	Рис. 11, <i>в, ж, и, н</i>	Хаотическая динамика с чертами перемежаемости, но без ламинарной стадии
Рис. 6 в [1]	Рис. 1, 2	При больших значениях коэффициента нелинейности K_a возможны периодические колебания
Рис. 7, <i>б</i> в [1]	Рис. 6, <i>в</i>	«Хаос смещающегося предельного цикла» versus квазипериодическая стадия перемежаемости
Рис. 8, 9 в [1]	Рис. 5, 8, 9	Перемежаемость с (квази)ламинарной фазой

имеют место черты сходства в их поведении (таблица). Кроме того, можно усмотреть сходство в морфологии временных реализаций, обсуждавшихся выше и на графиках рис. 2, 7, 8, 16 в статье [11] о режимах в автогенераторах с частотно-фазовым управлением.

Анализ результатов моделирования [1] и лабораторного эксперимента дает основание ожидать, что радиотехническая система на рис. 2 в [1] послужит прецедентом нелинейно-динамического устройства, располагающего к диверсификации, а тем самым – к порождению разнообразных по своим свойствам источников регулярных и хаотических режимов динамики.

По мнению авторов, открывается новое направление исследований: установление зависимости вида нелинейности от формы и амплитуды сигнала $V_{вх}(t)$ – совсем не обязательно гармонического и даже периодического. По оценкам авторов, выбором вида сигнала $V_{вх}(t)$ возможно формировать в динамической системе нелинейность желаемого типа. Это открывает перспективу неограниченной диверсификации динамических систем, наделяемых тем или иным характером нелинейности. Причем в принципе осуществима и система с эволюционирующей – непрерывно и/или дискретно – нелинейностью. Тогда, вероятно, нелинейность обретает статус особой динамической переменной [12].

Авторы признательны профессору Саратовского государственного университета С.П. Кузнецову за стимулирующее внимание к теме работы.

Библиографический список

1. *Измайлов И.В., Поызнер Б.Н.* Хаос в радиотехническом устройстве с квадратичным фазовым модулятором и интерференционным усилением квазигармонического сигнала: модель и вычислительный эксперимент // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18, № 1. С. 61.

2. Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by ring cavity system // Opt. Comm. 1979. Vol. 30. №2. P. 257.
3. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987.
4. Кузнецов С.П. Динамический хаос. М: Физматлит, 2001.
5. Carmon T., Buljan H., Segev M. Spontaneous pattern formation in a cavity with incoherent light // Optics Express. 2004. Vol. 12, №15. P. 3481.
6. Новые физические принципы оптической обработки информации / Под ред. С.А. Ахманова, М.А. Воронцова. М.: Наука, 1990.
7. Розанов Н.Н. Оптическая бистабильность и гистерезис в распределенных нелинейных системах. М.: Наука, 1997.
8. Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. Управление хаосом в системе Икеды: упрощенная модель в виде точечного отображения // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, №2. С. 66.
9. Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. Управление хаосом в системе Икеды: пространственно-временная модель // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, №2. С. 87.
10. Измайлов И.В., Лячин А.В., Поизнер Б.Н. Детерминированный хаос в моделях нелинейного кольцевого интерферометра. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007.
11. Пономаренко В.П. Динамические режимы и нелинейные эффекты в автогенераторах с частотно-фазовым управлением // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т. 16. №6. С. 18.
12. Измайлов И.В., Поизнер Б.Н. Генерация нелинейности для увеличения разнообразия систем с динамической и статической неустойчивостью // Изв. вузов. Физика. 2010, № 2. С. 18.

*Томский государственный
университет*

*Поступила в редакцию 16.06.2009
После доработки 5.09.2009*

EXPERIMENTS WITH A SOURCE OF CHAOS – A RADIO-ELECTRONIC DEVICE WITH SQUARE-LAW PHASE MODULATOR AND INTERFERENCE AMPLIFICATION OF QUASI-HARMONIC SIGNAL

I.V. Izmailov, B.N. Poizner

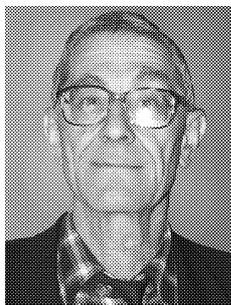
A modified radio-electronic analog of the nonlinear ring cavity is realized in laboratory. The device represents a special class of oscillations or waves sources. An operation principle of the sources is based on interference amplification of feedback signal by an input signal. A laboratory experiments are performed, the likeness of their results and simulation data is shown. An intermittency, chaos, regular, static modes are detected. A thesis on controlled nonlinearity of dynamical systems is suggested.

Keywords: Interference amplification, delayed feedback, bifurcation, chaos, intermittency, static state, controlled nonlinearity.



Измайлов Игорь Валерьевич – родился в Алма-Ате (1976), окончил Томский государственный университет (ТГУ, 1999). Учился в аспирантуре (1999–2002) и докторантуре (2006–2009) ТГУ. Работает в ТГУ старшим научным сотрудником радиофизического факультета. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ТГУ (2002). Ведёт исследования, ориентированные на выявление новых синергетических феноменов и закономерностей нелинейной динамики в системах различной природы, на применение их в радиофизических и оптических устройствах (обработки и защиты информации, адаптивной, сингулярной оптики, функциональной электроники). Опубликовал три монографии и одно учебное пособие с грифом УМО (в соавторстве). Автор 85 научных статей по направлениям, указанным выше (из них 35 – в рецензируемых журналах).

634050, Томск, пр. Ленина, 36
ТГУ, РФФ, каф. квантовой электроники и фотоники
E-mail:izmi@elefot.tsu.ru



Поизнер Борис Николаевич – родился в Томске (1941), окончил радиофизический факультет Томского государственного университета. Защитил кандидатскую диссертацию по теории колебаний и волн (1970), профессор кафедры квантовой электроники и фотоники ТГУ. Читает лекции по нелинейной оптике, лазерной технике, основам синергетики, социальной информатике. Автор и соавтор более 400 публикаций, 10 изобретений, 17 учебных пособий и монографий по физике лазеров, процессам самоорганизации и хаотизации в оптических, радиофизических, социокультурных системах, проблемам вузовской педагогики и (само)образования, науковедению и культурологии. Заслуженный работник высшей школы РФ (2005). Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.267.04 при ТГУ. Действительный член Организации российских библиофилов.

634050, Томск, пр. Ленина, 36
ТГУ, РФФ, каф. квантовой электроники и фотоники
E-mail:pznr@elefot.tsu.ru