УДК517.862

ХАОТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ПРОТЯЖЕННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ С ЦЕПОЧКОЙ ДИОДОВ ГАННА

ЮРЧЕНКО Л.В., ЮРЧЕНКО В.Б.

Разрабатывается эффективная математическая модель для расчета во временной области сложных широкополосных автоколебаний в цепочках диодов Ганна с учетом их нелинейного взаимодействия в открытой микрополосковой линии передачи с запаздыванием. Предлагаются режимы генерации многочастотных и хаотических колебаний и условия перехода системы от регулярной динамики к хаотической в зависимости от величины параметра нелинейности и нагрузочного сопротивления.

1. Введение

Одним из возможных подходов к созданию генераторов шума с управляемыми характеристиками, широко применяющихся в различных областях науки и техники (радиолокация, связь, медицина, биология, криптография), является принцип динамической хаотизации колебаний в системах с пространственно локализованными нелинейными элементами. Со времени появления теории динамического хаоса в этой области получено большое количество результатов, которые свидетельствуют о возможности применения генераторов хаоса в тех областях, где ранее использовались шумовые источники, построенные по схеме усиления шумов естественного происхождения [1,2].

Одним из перспективных направлений по использованию динамического хаоса является создание автоколебательных систем типа «активный нелинейный элемент – задержанная обратная связь» [3-5]. Обобщением этой схемы является построение цепочки активных элементов, соединенных протяженными участками микрополосковых линий, в которых происходит задержка сигналов взаимной связи между отдельными элементами. Синхронизация сигналов взаимной связи, приходящих к каждому активному элементу (узлу цепочки) от соседних элементов, во многих случаях приводит к возникновению в линии режима многочастотной генерации [6]. В то же время, в условиях сильной нелинейности и достаточно больших времен задержки можно ожидать появления более сложных хаотических режимов колебаний.

Эффекты, связанные с хаотизацией колебаний в многоэлементных нелинейных системах с запаздыванием, еще недостаточно изучены и не используются в полной мере. Имеются отдельные работы, где хаотические колебания реализуются и изучаются в одноэлементных системах на основе активных твердотельных приборов [5,7]. Однако в этих работах внимание уделяется скорее исследованию сложной внутренней динамики отдельного прибора (хаосу множественных доменов, например, в диодах Ганна, в квантовых сверхрешетках), чем влиянию запаздывания обратной связи на процесс хаотизации.

Целью данной работы является численное моделирование во временной области широкополосных и хаотических автоколебаний в открытых микрополосковых линиях с дискретными активными элементами (диодами Ганна), между которыми существует обратная связь с задержками, вызванными распространением волн на участках микрополосковых соединений.

В простейшем виде роль задержек проявляется в системах, которые описываются алгебраически-разностными уравнениями [8]. Такие уравнения описывают дискретные отображения, которые в определенных условиях приводят к явлению «перемешивания» в фазовом пространстве решений, что и обуславливает хаотическую динамику. В чистом виде дискретные отображения реализуются тогда, когда нелинейный элемент обладает мгновенной реакцией на внешнее воздействие. Приближение мгновенного отклика активного элемента лежало в основе наших предыдущих исследований электродинамических систем со сложной динамикой поля [9,10].

Данное исследование является логическим продолжением работы [6], в которой рассматривались системы и эффекты, впервые учитывающие собственные характерные времена активных устройств в задачах с запаздыванием. Эти времена обусловлены собственными емкостями и индуктивностями и ограничивают частоты колебаний сверху таким образом, что хаотические режимы, если они существуют, возможны лишь в диапазоне ниже собственных частот активных устройств.

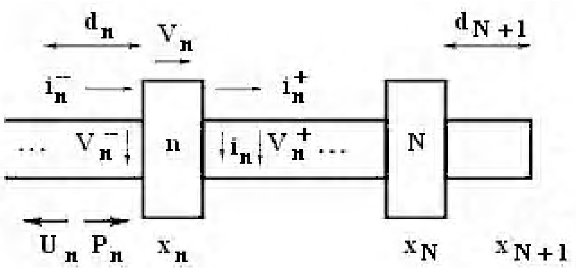
Активные системы с линиями передачи изучались ранее в частотной области [11,12], когда применима концепция комплексного импеданса как функции частоты. Наиболее продвинутой формой такого подхода являются гибридные методы [13] и методы гармонического баланса. В этих методах линейная часть задачи (распространение и рассеяние волн в пассивных компонентах структуры) в определенном смысле решается точно, а нелинейная анализируется в рамках приближений, справедливых для выбранного диапазона частот.

Для процессов с произвольной и сложной зависимостью от времени, таких как короткие импульсы, широкополосные сигналы, хаотическая динамика, требуется прямое моделирование во временной области, так как типичные методы анализа активных систем в частотной области не вполне применимы. Нами предложена такая модель активной системы с запаздыванием, которая позволяет получить эффективное решение данного класса задач во временной области, используя минимальные вычислительные ресурсы.

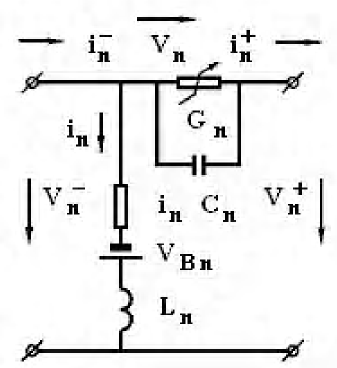
2. Постановка задачи

В случае малой пространственной дисперсии микрополосковой линии эффектом дисперсии на ограниченном участке линии можно пренебречь. При этом линейная часть задачи существенно упрощается и распространение волн на волноводных участках описывается известным решением Римана-Даламбера одномерного волнового уравнения. В наших расчетах мы используем это приближение для линейной части задачи, решаемой во временной области, в то время как нелинейная часть моделируется в полном объеме.

Рассмотрим полубесконечную одномерную линию передачи (рис.1,а). Четырехполюсные блоки n (рис.1,б) представляют собой цепи с активными элементами, которые могут иметь любой вид. В данной работе в качестве активных элементов мы рассматриваем диоды Ганна. В настоящее время они могут работать в широком диапазоне частот, а отдельные их виды (например, на основе нитрида галлия GaN) работают при частотах $f > 100$ГГц. В этом исследовании диоды Ганна моделируются в терминах заданных вольтамперных характеристик (ВАХ), имеющих участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС).



а



б

Рис. 1. Линия передачи с N-активными блоками (а); активный блок, состоящий из диода Ганна G_n, нагрузочного сопротивления r_n, емкости C_n, индуктивности L_n и источника напряжения V_{Bn} (б)

Вольтамперная характеристика диода Ганна (рис.2) дается той же аппроксимацией, как в [14], которая является типичной для структур на основе арсенида и нитрида галлия:

$$i_{Gn} = G_n(E) = G_0\ [(E+0{,}2E^4)/(1+0{,}2E^4)+0{,}05E], \quad (1)$$

где $i_{Gn} = I_{Gn} Z_0 / V_0$ и $E = E_{Gn} = V_{Gn} / V_0$ – безразмерные ток и напряжение на диоде ($E > 0$); I_{G0} и V_0 – ток и напряжение, характеризующие диод (в точке максимума $G_n(E)$; $I_{G\max} = 1{,}35\ I_{G0}$ и $V_{G\max} = 1{,}77\ V_0$), $G_0 = Z_0 I_{G_0} / V_0$ – коэффициент связи диода с линией [9]; Z_0 – импеданс линии (для GaN диода, описанного в [15], $I_{G\max} \approx 9$А и $V_{G\max} \approx 45$В, что при $Z_0 = 50$ Ом дает $G_0 = 13$).

Необходимо отметить, что подобная модель для диода стала инженерной нормой для расчетов во временной области и применяется, например, в известной системе проектирования HSPICE.

Приближение, описанное выше, соответствует модели прибора, работающего с ограниченным накоплением объемного заряда (ОНОЗ). Режим ОНОЗ обеспечивает более широкополосное функционирование диодов Ганна (здесь отношение максимальной частоты генерации к минимальной больше десяти: $f_{\max} / f_{\min} > 10$). Приближение этого вида означает мгновенный отклик диодов на изменение внешнего напряжения и соответствует пренебрежению детальным моделированием сильно-полевых областей в диодных структурах. Вместо этого в нашей работе собственные характерные времена, свойственные диодам, моделируются эквивалентной емкостью и индуктивностью активных устройств (см. рис.1,б).

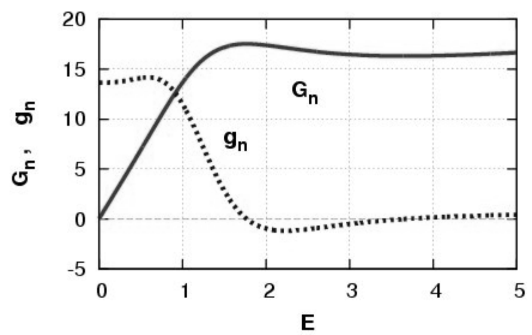


Рис. 2. Вольтамперная характеристика $G_n = G_n(E)$ и дифференциальная проводимость $g_n(E) = dG_n(E)/dE$ диода Ганна

Электромагнитное самовозбуждение возникает, когда напряжение на диоде попадает в область ОДС. Колебания развиваются в ответ на малую флуктуацию напряжения смещения в этой области или же в результате переключения напряжения смещения из устойчивой области в нестабильную область ОДС.

Полная система уравнений, описывающая токи и напряжения в цепочках, состоит из следующих трех групп уравнений:

1) волнового уравнения для тока $i_n(\tau, x)$ и напряжения $E_n(\tau, x)$ в каждой секции n микрополосковой линии передачи $x_{n-1} < x < x_n$;

2) уравнений цепи, записанных для каждого блока n в терминах тока $i_n(\tau)$ и напряжения $E_n(\tau)$, определенных, как показано на рис.1,б;

3) граничных условий для волновых уравнений в точке подсоединения цепи в линию $(x_n^{\pm} = x_n \pm 0)$, которые устанавливают связь между током и напряжением в линии в точке $x_n^{\pm}$ $(i_n^{\pm}(\tau) = i_n(\tau, x_n^{\pm})$, $E_n^{\pm}(\tau) = E_n(\tau, x_n^{\pm}))$ и током и напряжением цепи ($i_n(\tau)$, $E_n(\tau)$), как показано на рис.1,а.

Здесь мы рассматриваем последовательную цепочку (см. рис.1,а) с активными блоками, показанными на рис.1,б (все блоки считаются идентичными). Для данной цепочки из *N* блоков система уравнений приобретает вид:

$$\partial E_n / \partial x = -\partial i_n / \partial \tau \ , \partial i_n / \partial x = -\partial E_n / \partial \tau \ , \qquad (2)$$

$$E_n^- = i_n R_n + \tau_{Ln} di_n / d\tau - E_{Bn} \ ,$$

$$i_n^+ = G_n(E_n) + \tau_{Cn} dE_{Gn} / d\tau \ , \ E_n = E_{Gn} = E_{Cn} \ , \ (3)$$

$$i_n = i_n^- - i_n^+ \ , E_n = E_n^- - E_n^+ \ , \qquad (4)$$

где $n = 1...N$. Точки подключения блоков в линию описываются координатами $x_{n+1} = x_n + d_{n+1}$, где $x_1 = 0$, $d_1 = 0$. Система уравнений дополняется условием излучения при $x = -\infty$ (нет приходящих волн от открытого конца линии передачи) и условием короткого замыкания $E_{N+1}^- = 0$ при $x = x_{N+1}$, обеспечивающим отражение волны в этой точке.

Уравнения (2) - (4) записаны в терминах нормированных переменных, таких как относительная координата $x = X / a$, время $\tau = ct / a$, напряжение $E_n = V_n / V_0$ и ток $i_n = Z_0 I_n / V_0$, где a – пространственный масштаб, используемый для нормировки, c – скорость волны в линии передачи, $R_n = r_n / Z_0$, $\tau_{Cn} = cZ_0 C_n / a$, $\tau_{Ln} = cL_n / (Z_0 a)$, и $\tau_n = 2\pi(\tau_{Ln} \cdot \tau_{Cn})^{1/2}$.

После подстановки решения Римана и соответствующих упрощений эти уравнения приобретают вид дифференциально-разностных уравнений:

$$dU_n / d\tau = F_{Un}(U_n, P_n) \ , \ dP_n / d\tau = F_{Pn}(U_n, P_n) \ , \quad (5)$$

где F_{Un} , F_{Pn} – алгебраические функции неизвестных U_n и P_n , взятые с различными задержками по времени δ_n и с отсутствием задержек по отношению к текущему моменту времени $\tau = ct / a$. Функции U_n , P_n – профили волны напряжения, определяемые в точке локализации цепи $x = x_n^-$ (слева от n -го активного блока) и распространяющиеся влево и вправо вдоль n -й секции микрополосковой линии. Функции F_{Un} , F_{Pn} определяются следующим образом:

$$F_{Un}(\vartheta_n) = F_{Un+1}(\vartheta_{n+1} - d_{n+1}) -$$
$$-0,5[F_{Ln}(\vartheta_n) + F_{Cn}(\vartheta_n)] \ , \qquad (6)$$

$$F_{Pn}(\vartheta_n) = F_{Pn-1}(\vartheta_{n-1} - d_n) +$$
$$+0,5[F_{Ln}(\vartheta_n) - F_{Cn}(\vartheta_n)] \ , \qquad (7)$$

$$F_{Ln}(\vartheta_n) = \omega_{Ln}\{U_n(\vartheta_n) -$$
$$-P_{n-1}(\vartheta_{n-1} - d_n) +$$
$$+R_n[U_n(\vartheta_n) + P_{n-1}(\vartheta_{n-1} - d_n) -$$
$$-U_{n+1}(\vartheta_{n+1} - d_{n+1}) - P_n(\vartheta_n)]\} \ , \qquad (8)$$

$$F_{Cn}(\vartheta_n) = \omega_{Cn}\{U_{n+1}(\vartheta_{n+1} - d_{n+1}) +$$
$$+P_n(\vartheta_n) + G_n(E_{Gn})\} + dE_{Bn}(\tau) / d\tau \ , \qquad (9)$$

где $n = 1, 2, ...N$, $\vartheta_n = x_n + \tau$, $P_0 = 0,5R_1G_1(E_{G0})$,

$F_{P0} = 0$, $F_{U\ N+1}(\vartheta_{N+1} - d_{N+1}) = F_{P\ N}(\vartheta_N - 2d_{N+1})$,

$\omega_{Cn} = 1 / \tau_{Cn}$ и $\omega_{Ln} = 1 / \tau_{Ln}$ – характерные частоты, связанные с емкостью C_n и индуктивностью L_n цепи; R_n – сопротивление, нормализованное на импеданс линии Z_0 (как и все импедансы); $G_n(E_{Gn})$ – ток в диоде,

$$E_{Gn}(\tau) = E_{Bn}(\tau) -$$
$$-U_{n+1}(\vartheta_{n+1} - d_{n+1}) + P_n(\vartheta_n) + U_n(\vartheta_n) - P_{n-1}(\vartheta_{n-1} - d_n)$$

– напряжение на диоде ($E_{G0} = E_{Gn}(0)$ – начальное напряжение) и E_{Bn} – напряжение смещения. Самовозбуждение является результатом малой начальной флуктуации $E_{Bn}(\tau)$, которая впоследствии уменьшается до нуля.

В случае малых колебаний условия их возникновения и частотный спектр могут быть найдены приближенно с помощью концепции нулевого комплексного импеданса системы в режиме генерации [12,13]. В работе [6] мы обобщили этот подход, применив его для открытой системы, излучающей энергию на бесконечность, что позволило для системы с одним диодом получить хорошую корреляцию аналитических результатов с численным моделированием.

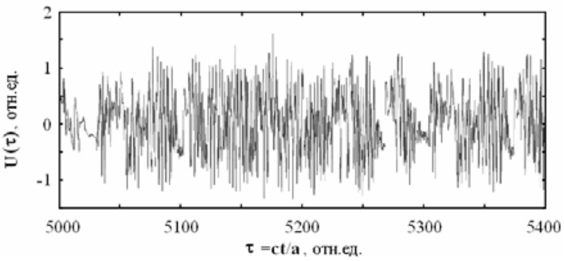
3. Численные результаты

Для численного моделирования выбирались такие же параметры устройств, как в работах [9, 15], и использовался метод [16] Дормана-Принса для решения уравнений (5) - (9).

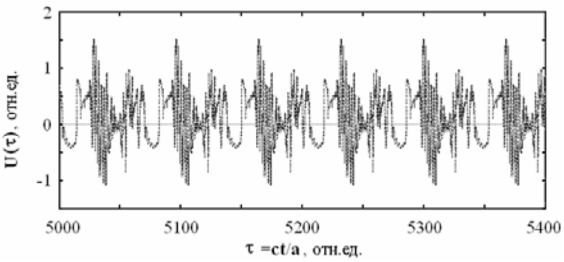
Рассмотрим линию, состоящую из N активных блоков (рис. 1,б). В отличие от системы с одним диодом с увеличением N наблюдается уширение спектральных линий и увеличение их числа даже в случае регулярной цепи идентичных блоков. Если есть достаточное сопротивление в каждом блоке (например, $R = 5$), линии спектра остаются узкими (см. рис. 4,а [6]).

Последовательное соединение активных элементов (сосредоточенных цепей с диодами Ганна) протяженными секциями микрополосковой линии, создающими значительные задержки обратной связи, может привести к динамическому хаосу в системе даже в случае не мгновенного отклика активных элементов, обусловленного их реактивными компонентами.

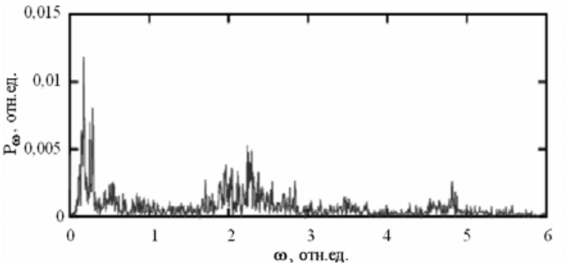
Сравним колебания, возникающие при малых и больших значениях нагрузочных сопротивлений в активных блоках. Рис. 3, а, б показывают профиль волны, излучаемой из системы с $N = 4$ активными блоками в бесконечную открытую линию, когда нагрузочное сопротивление есть $R = 0{,}1$ (см. рис. 3,а) и $R = 0{,}5$ (см. рис. 3,б) ($R = r_n / Z_0$ одинаково для всех n).



а



б



в

Рис. 3. Профиль излученной волны для цепи, состоящей из $N = 4$ блоков, когда $G_0 = 13$, $d_1 = 6{,}91$, $d_2 = 3{,}77$, $d_3 = 8{,}17$, $d_4 = 3{,}14$, а – если $R = 0{,}1$ и б – если $R = 0{,}5$; в – частотный спектр излучения в обоих случаях

При этом длины микрополосковых секций выбраны произвольным нерегулярным образом и составляют $d_1 = 6{,}91$, $d_2 = 3{,}77$, $d_3 = 8{,}17$, $d_4 = 3{,}14$, а коэффициент связи диода с линией (параметр нелинейности) $G_0 = 13$.

Рис. 3,в показывает частотный спектр излучаемого поля, который в обоих случаях $R = 0{,}1$ и $R = 0{,}5$ выглядит очень похоже, несмотря на внешнее отличие временных зависимостей поля, приведенных на рис. 3, а, б.

Нерегулярность цепи активных блоков приводит к тому, что расширение спектральных линий при малых R становится более сложным, а спектр – квазинепрерывным (рис. 3,в). Профиль волны излучения выглядит весьма хаотическим в течение всего длительного времени вычисления, если R мало (вплоть до времени $\tau = 8000$, до которого велись вычисления при $R = 0{,}1$, рис.3,а), но переключается в регулярный режим после длительного периода времени τ_S, если R не очень мало ($\tau_S = 1400$, $R = 0{,}5$, рис. 3,б). Оба спектра, однако, имеют заметную квазинепрерывную компоненту.

Более чувствительными методами идентификации хаоса по сравнению с анализом спектра мощности колебаний являются сечения Пуанкаре и автокорреляционные функции $\gamma(\tau)$ сигнала. Автокорреляционные функции, построенные для двух случаев колебаний поля, представленных на рис.3,а,б, приведены на рис.4. Как видим, более нерегулярному колебанию как функции времени (см.рис.3,а) соответствует достаточно быстрый спад автокорреляции от 1 до уровня 0,1 за относительные времена $ct / a \sim 10$ (кривая 1, рис.4) и остаются ниже этого уровня все последующее время. Такое поведение автокорреляционной функции является характерным признаком достаточно хаотичных сигналов. В случае же временной зависимости, приведенной на рис. 3,*б*, автокорреляционная функция обнаруживает очень четкую периодическую структуру (кривая 2, рис.4) с достаточно точным воспроизведением временной формы сигнала с периодом $T \sim 68$ в относительных единицах (отметим, что полная длина цепочки $L \sim 22$).

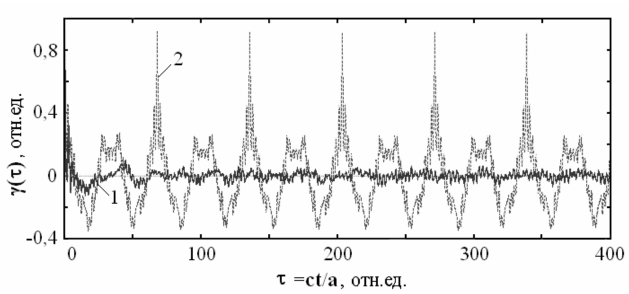
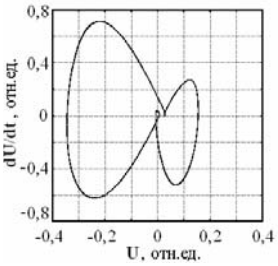


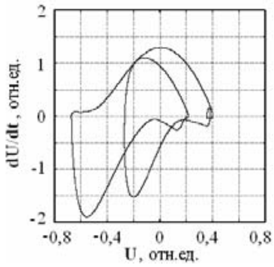
Рис. 4. Автокорреляционная функция для случая нерегулярной цепочки, состоящей из $N = 4$ блоков: $R = 0{,}1$ (кривая 1) и $R = 0{,}5$ (кривая 2)

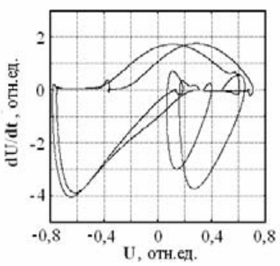
Переход от регулярной динамики к хаотической особенно хорошо виден на сечениях Пуанкаре (рис.5-8). Рис. 5 показывает удвоение периода колебаний с увеличением параметра нелинейности диода G в системе с одним диодом и балансным отрезком $d = 3{,}14$. Этот отрезок способствует возникновению колебаний и переходу в сильно нелинейный режим, но хаос, тем не менее, еще не наблюдается.

Рис. 6 показывает отсутствие хаоса в структуре с одним диодом без балансного отрезка и без нагрузочного сопротивления ($R = 0$) даже при значении $G = 16$, и наличие явно выраженного хаоса в структуре с $N = 4$ диодами и $G = 13$, $R = 0$, тогда как при $R = 5$ в этой же структуре ($N = 4$) имеются лишь многочастотные колебания. На рис. 7 видно, как степень хаотичности динамики несколько уменьшается с ростом R от $R = 0$ до $R = 0{,}3$ и далее до $R = 0{,}5$ в нерегулярной цепочке с $N = 4$ диодами при относительно небольших временах развития процесса от $T = 300$ до $T = 1300$.



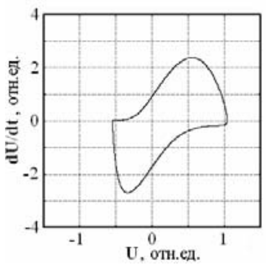
а



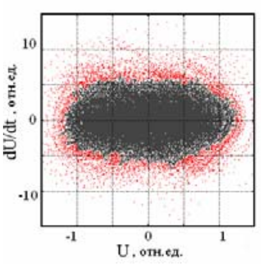


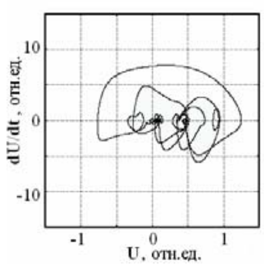
б в

Рис. 5. Сечения Пуанкаре для волн, излученных цепочкой, состоящей из $N = 1$ блоков ($d = 3{,}14$): а – $G = 2$; б – $G = 10$; в – $G = 11{,}2$



а



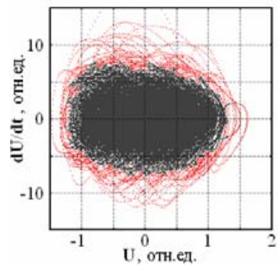


б в

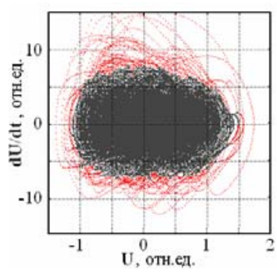
Рис. 6. Сечения Пуанкаре для волн, излученных цепочкой, состоящей из: а – $N = 1$ блоков, $d = 0$; $G = 16$, $R = 0$; б – $N = 4$, $G = 13$, $R = 0$, $d = 5$; в – $N = 4$, $G = 13$, $R = 5$, $d = 5$

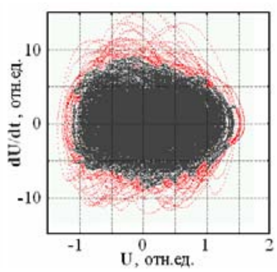
При достаточно длительном протекании процесса в структуре с $R = 0{,}5$ динамика несколько упрощается, оставаясь все же весьма сложной, многочастотной, тогда как при достаточно малых значениях $R = 0{,}1$ динамика остается хаотической даже при $T = 2000 - 3000$, как видно из рис. 8.

В целом, при анализе подобных систем наблюдается тенденция, что хаотические режимы проявляются тогда, когда активное сопротивление нагрузки диодов мало по сравнению с собственным импедансом линии ($R << 1$).



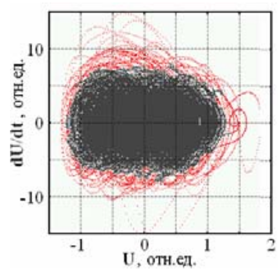
а



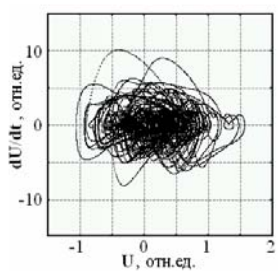


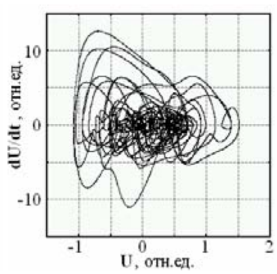
б в

Рис. 7. Сечения Пуанкаре для волн, излученных цепочкой, состоящей из $N = 4$ блоков: а – $R = 0$, $T = 2000 - 3000$; б – $R = 0{,}3$, $T = 300 - 1300$; в – $R = 0{,}5$, $T = 300 - 1300$



а





б в

Рис. 8. Сечения Пуанкаре для волн, излученных цепочкой, состоящей из $N = 4$ блоков, $T = 2000 - 3000$: а - $R = 0{,}1$; б - $R = 0{,}3$; в - $R = 0{,}5$

4. Заключение

Построена эффективная математическая модель для расчета во временной области сложных широкополосных автоколебаний в цепочках диодов Ганна в микрополосковой линии передачи с учетом задержки обратной связи. В последовательных цепочках с диодами Ганна выявлена возможность сложной многочастотной генерации колебаний. Для системы с одним диодом и балансным отрезком увеличение параметра нелинейности диода G способствует переходу колебаний в сильно нелинейный режим, в то время как в этой же структуре без балансного отрезка и без нагрузочного сопротивления наблюдаются регулярные колебания даже при большом значении G.

Переход от регулярной динамики к хаотической особенно хорошо виден в структурах с несколькими диодами. При этом увеличение или уменьшение значений параметра нелинейности не играет столь существенной роли, как изменение значений нагрузочного сопротивления. С ростом нагрузочного сопротивления степень хаотичности динамики уменьшается. Напротив, в цепочках с малым нагрузочным сопротивлением в открытый бесконечный участок линии может излучаться хаотическое колебание, иногда сопровождаемое многочастотной генерацией.

Предложенные методы моделирования и анализа активных микрополосковых систем, а также эффекты многочастотной и хаотической генерации, описанные в работе, представляют интерес для создания новых приборов, таких как генераторы сложных сигналов для шумовой радиолокации и т.п. на основе компактных твердотельных устройств.

Литература: **1.** *Кислов В.Я., Залогин Н.Н., Мясин Е.А.* Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 1979. Т.24, №6. С.1118-1130. **2.** *Кузнецов С.П.* Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т.25, №12. С.1410-1428. **3.** *Lukin K.A.* Millimeter Wave Noise Radar Technology // MSMW'98 Symposium, Kharkov, Ukraine: 15-17 Sept.1998: Proc. Vol.1. P.94-97. **4.** *Lukin K.A.* Noise Radar Technology: the principles and short overview // Applied Radio Electronics. 2005. Vol.4, No.1. P.74-79. **5.** *Shiau Yuo-Hsien, Peng Yih-Ferng, Cheng Yi-Che and Hu Chin-Kun.* Multistability and Chaos in a Semiconductor Microwave Device with Time-Delay Feedback // Journal of the Physical Society of Japan. April 2003. Vol.72, No.4, P.801-804. **6.** *Юрченко Л. В., Юрченко В. Б.* Генерация многочастотных колебаний в микрополосковых линиях передачи с диодами Ганна // Радиоэлектроника и информатика. 2007. №2. С.24-29. **7.** *Lin J. T. and Cao. J. C.* Terahertz generation and chaotic dynamics in GaN NDR diode // Semicond. Sci. Technol. March 2004. Vol.19, No.3. P.451-456. **8.** *Lukin K. A. et al.* Method of difference equation in the resonator problem with a nonlinear reflector // Soviet Physics – Doklady. 1989. Vol.34. P.977-979. **9.** *Yurchenko L. V. and Yurchenko V. B.* Chaos in a Cavity with Active Microwave Devices // Appl. Radio Electronics. 2005. Vol.4, No. 1. P.80-84. **10.** *Юрченко Л. В. и Юрченко В. Б.* Генерация ультракоротких импульсов в резонаторе с активным слоем и диэлектрическим зеркалом // Прикладная радиоэлектроника. 2005. Т.4, № 2. С.195-200. **11.** *Kurokawa K.* The Single-Cavity Multiple-Device Oscillator // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 1971. Vol. MTT-19. P.793-801. **12.** *Russell K. J.* Microwave Power Combining Technique // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 1979. Vol. MTT-27. P.472-478. **13.** *Erturk V. B., Rojas R. G. and Roblin P.* Hybrid Analysis/ Design Methodfor Active Integrated Antennas // IEE Proc. Microw. Antennas Propag. 1999. Vol.146. P.131-137. **14.** *Shur M.* GaAs Devices and Circuits // Plenum Press. –London. 1987. **15.** *Alekseev E. and Pavlidis D.* GaN Gunn diodes for THz signal generation // IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest. 11-16 June 2000. Vol.3. P.1905-1908. **16.** *Hairer E. and Wanner G.* Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems // Springer-Verlag. Berlin. 1991.

Поступила в редколлегию 11.08.2009

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Лукин К.А.

Юрченко Лидия Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела нелинейной динамики электронных систем ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков. Научные интересы: моделирование динамического хаоса в электронных системах, автогенерации широкополосных шумовых сигналов и ультракоротких импульсов. Адрес: Украина, 61085, Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12, тел.: +38-057-7203-349,

email: yurchenk@ire.kharkov.ua

Юрченко Владимир Борисович, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела радиофизики твердого тела ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков. Научные интересы: ранее - теория переноса горячих электронов в полупроводниковых приборах, фото- и термо-электрические эффекты, явления нестабильности и хаос; в последнее время - нелинейная динамика электронных систем, распространение волн и моделирование антенн. Адрес: Украина, 61085, Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12. Тел.:+38-057-7203-569, email: yurchenk@ire.kharkov.ua