

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ СЕРИИ ИМПУЛЬСОВ ДИОДАМИ ГАННА В ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ

Л. В. Юрченко, В. Б. Юрченко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [yurchenk@ire.kharkov.ua](mailto:yurchenk@ire.kharkov.ua)*

Проведено моделирование во временной области активных систем с диодами Ганна, соединенных параллельно отрезками микрополосковой линии. Обнаружена сложная динамика электромагнитного поля, излученного в открытую секцию микрополосковой линии. В системе с отдаленным резонатором, когда активные блоки отделены от компактных резонансных устройств протяженными секциями микрополосковой линии, показана возможность генерации серии высокочастотных импульсов. Показано, что в системах, имеющих несколько параллельных ветвей активных блоков различной длины, возможна генерация сложных квазихаотических сигналов. Ил. 8. Библиогр.: 16 назв.

**Ключевые слова:** высокочастотный импульс, диод Ганна, линия задержки, система с запаздыванием.

В настоящее время ультракороткие импульсы находят широкое применение в различных областях:

- измерение расстояний радиолокационными методами с высокой точностью и разрешающей способностью;
- получение радиоизображений поверхностей и различных объектов сложной формы;
- контроль и управление технологическими процессами;
- решение задач обнаружения малоразмерных целей на фоне подстилающей поверхности и т. д. [1].

В данной работе численно исследован процесс генерации сигналов, состоящих из серии ультракоротких импульсов, в активных системах с задержкой обратной связи, а также рассмотрена возможность хаотизации таких сигналов. Эти системы могут быть использованы в качестве источника колебаний в шумовой радарной технологии для создания шумовых сверхширокополосных радаров [2].

Системы такого типа представляют собой массив активных приборов, которые располагаются в распределенных резонансных структурах (например в открытых квазиоптических резонаторах) и электродинамически связаны посредством распространения волн на довольно заметные расстояния по сравнению с характерной длиной волны. Чаще всего они подсоединяются параллельно и традиционно изучаются с целью сложения мощности генерируемых колебаний, особенно в наиболее коротковолновых областях спектра (субмиллиметровых длин волн), где мощность отдельно взятого прибора слишком мала. Как правило, такие системы моделируются в частотной области [3, 4], когда применима концепция комплексного импеданса как функции частоты. Наиболее продвинутой формой такого подхода являются гибридные методы [5] и методы гармо-

нического баланса [6]. В этих методах линейная часть задачи (распространение и рассеяние волн в пассивных компонентах структуры) в определенном смысле решается точно, а нелинейная часть анализируется в рамках приближений, справедливых для выбранного диапазона частот.

Целью нашего исследования является сложная нетрадиционная сверхширокополосная динамика поля в сильно-нелинейных системах с запаздыванием с учетом не мгновенной реакции активных устройств на внешнее воздействие. Сложность задач этого класса состоит в том, что в них необходимо получать строгие самосогласованные решения во временной области для задачи самовозбуждения активных высокочастотных устройств с распределенными резонансными линиями обратной связи без специальных ограничений на величину и форму (т. е. на спектральный состав) возникающего сигнала. Решение указанных задач в наиболее общей и строгой постановке требует совместного моделирования как внутренней нелинейной динамики самих активных приборов (их электронно-дырочной и электромагнитно-полевой подсистем), так и линейной динамики электромагнитного поля в резонансных (пассивных) распределенных системах обратной связи. В такой общей постановке решение этой задачи для реальных трехмерных устройств требует гигантских вычислительных ресурсов [7] и на сегодняшний день практически недостижимо. Поэтому возникает необходимость в разработке новых специальных методов и моделей, которые, в отличие от общих универсальных подходов, были бы достаточно эффективны именно для таких задач и не были бы столь ресурсозатратными.

Нами предложена эффективная 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, обеспечивающая решение данного класса задач с использованием минимальных вычислительных ресурсов.

**1. Постановка задачи.** В наших предыдущих работах [8–10] мы исследовали сложную нелинейную динамику электромагнитного поля в распределенных системах диодов Ганна, соединенных последовательно протяженными секциями микрополосковой линии передачи.

В этой работе мы рассматриваем другую систему, которая представляет собой параллельное соединение  $N$  микрополосковых секций с диодами Ганна, как показано на рис. 1, а. Все активные блоки в этой схеме ( $n = 1 \dots N$ ) идентичны (рис. 1, б) и подключены параллельно к некоторому узловому ( $n = 0$ ) резонансному антенному элементу (рис. 1, в), который работает как отдаленный резонатор для данного набора активных элементов и в то же время как резонансная антенна, передающая электромагнитное излучение в открытую (бесконечную) секцию микрополосковой линии (рис. 1, а).

Отрезки микрополосковой линии длиной  $d_n$  и  $d_{s_n}$  обеспечивают запаздывание взаимной и обратной связи в этой системе. Они предполагаются достаточно длинными по сравнению с характерной длиной волны появляющегося излучения.

Четырехполюсные блоки  $n$  (рис. 1, б) представляют собой цепи с активными элементами, в качестве которых 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 заданной нелинейной вольт-амперной характеристики (ВАХ), имеющей участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС). ВАХ диода Ганна дается той же аппроксимацией, как в работе [11], которая является типичной для структур на основе арсенида и нитрида галлия. Подобная модель для диода стала инженерной нормой для расчетов во временной области и применяется, например, в известной системе проектирования *HSPICE*.

В частности, эта модель соответствует описанию 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.

Мы же учитываем собственную динамику подключенных активных приборов путем рассмотрения соответствующей эквивалентной активной цепи, состоящей из идеального диода с мгновенным откликом  $G_n$ , его эквивалентной емкости  $C_n$  и индуктивности  $L_n$  (рис. 1, б).

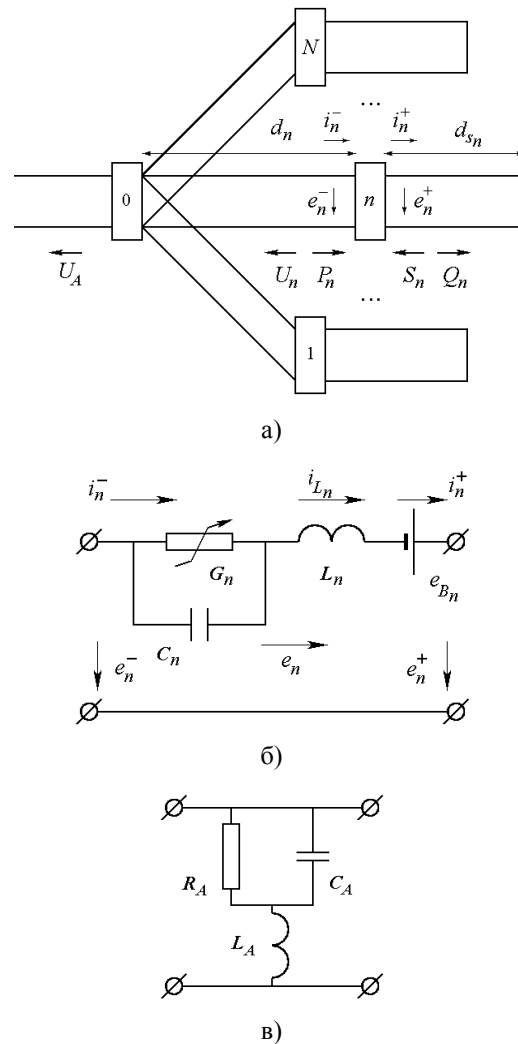


Рис. 1. Параллельное соединение  $N$  активных блоков (а); активный блок (б), состоящий из диода Ганна  $G_n$ , емкости  $C_n$ , индуктивности  $L_n$  и источника напряжения  $e_{B_n}$ ; резонансный антенный элемент (в)

Электромагнитное самовозбуждение возникает, когда напряжение на диоде попадает в область ОДС. Колебания развиваются в ответ на малую флуктуацию напряжения смещения  $e_{B_n}$  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 данной схеме, состоит из следующих трех групп уравнений:

– волновых уравнений для токов  $i_n(\tau, x)$  и напряжений  $e_n(\tau, x)$  в микрополосковой линии на различных ее участках и в открытой секции;

– уравнений цепи, записанных для каждого блока  $n$  в терминах тока  $i_n(\tau)$  и напряжения  $e_n(\tau)$ , определенных, как показано на рис. 1 (например для активных блоков  $i_n = i_n^- = i_n^+$ ,  $e_n = e_n^- - e_n^+$ ,  $i_n = i_{L_n} = i_{G_n} + i_{C_n}$ ,  $e_n = e_{C_n} + e_{L_n} - e_{B_n}$ );

– граничных условий для волновых уравнений в точке подсоединения блоков 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  $i_n(\tau)$ ,  $e_n(\tau)$  в момент времени  $\tau$ .

Эти условия дополняются также условием излучения при  $x = -\infty$  (нет приходящих волн из открытой секции  $n = 0$ ) и условием короткого замыкания на концах участков  $d_{S_n}$  (это приводит к появлению отраженных волн на этих участках).

В случае малой пространственной дисперсии микрополосковой линии 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, в отличие от более традиционного подхода, моделируется в полном объеме. Это позволяет нам свести задачу со сложными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных к задаче с эквивалентным набором обыкновенных дифференциально-разностных уравнений (уравнения с отклоняющимся аргументом). Несмотря на остающуюся сложность, вызванную запаздыванием, уравнения могут быть решены доступными числовыми методами [12]. В результате дифференциально-разностные уравнения на участках с активными блоками ( $n = 1 \dots N$ ) записываются в виде

$$\begin{aligned} U_n''(\mathcal{G}_n) = & -P_n''(\mathcal{G}_n - d_n) + \\ & + \omega_{L_n} e_{B_n}'(\tau) + 2\omega_{L_n} [S_n'(\mathcal{G}_n - 2d_{S_n}) - \\ & - U_n'(\mathcal{G}_n)] - \omega_{0_n}^2 [U_n(\mathcal{G}_n) + \\ & + P_n(\mathcal{G}_n - d_n) - G_n(e_{C_n})], \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} P_n(\mathcal{G}_n - d_n) = & U_n(\mathcal{G}_n - 2d_n) - \\ & - e_{C_A}(\tau - d_n) - U_A(\tau - d_n); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} S_n(\mathcal{G}_n) = & U_n(\mathcal{G}_n) + P_n(\mathcal{G}_n - d_n) - \\ & - S_n(\mathcal{G}_n - 2d_{S_n}); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} e_{G_n} = & e_{B_n} + 2[S_n(\mathcal{G}_n - 2d_n) - U_n(\mathcal{G}_n)] - \\ & - \tau_{L_n} [U_n'(\mathcal{G}_n) + P_n'(\mathcal{G}_n - d_n)]. \end{aligned} \quad (4)$$

В этих уравнениях  $U_n(\mathcal{G}_n)$ ,  $P_n(\mathcal{G}_n)$ ,  $Q_n(\mathcal{G}_n)$ ,  $S_n(\mathcal{G}_n)$ ,  $U_A(\tau)$  – амплитуды волн, бегущих в соответствующих секциях линии (рис. 1, а), записанные как функции временных переменных  $\mathcal{G}_n = \tau + d_n = \tau + x_n$ ,  $\mathcal{G}_{S_n} = \mathcal{G}_n + d_{S_n} = \tau + x_{S_n}$  и текущего времени  $\tau$  таким образом, что

$$\begin{aligned} i_n^+(\tau) = & S_n(\mathcal{G} - 2d_{S_n}) + S_n(\mathcal{G}_n), \\ e_n^+(\tau) = & -S_n(\mathcal{G} - 2d_{S_n}) + S_n(\mathcal{G}_n), \\ i_n^-(\tau) = & U_n(\mathcal{G}_n) + P_n(\mathcal{G}_n - d_n), \\ e_n^-(\tau) = & -U_n(\mathcal{G}_n) + P_n(\mathcal{G}_n - d_n), \\ i_{A_n}^+(\tau) = & U_n(\mathcal{G}_n - d_n) + P_n(\mathcal{G}_n), \\ e_{A_n}^+(\tau) = & -U_n(\mathcal{G}_n - d_n) + P_n(\mathcal{G}_n), \\ i_A^-(\tau) = & U_A(\tau), \\ e_A^-(\tau) = & -U_A(\tau). \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения (1)–(5) записаны в терминах нормированных переменных: 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,  $Z_0$  – импеданс линии. При этом величины  $\tau_{C_n} = cZ_0 C_n/a$ ,  $\tau_{L_n} = cL_n/(Z_0 a)$ ,  $\tau_{0_n} = 2\pi(\tau_{L_n} \tau_{C_n})^{1/2}$ ,  $\omega_{C_n} = 1/\tau_{C_n}$ ,  $\omega_{L_n} = 1/\tau_{L_n}$  и  $\omega_{0_n} = (\omega_{L_n} \omega_{C_n})^{1/2}$  определяют характерные времена и частоты, свойственные активным блокам, а функция  $G_n(e_{C_n})$  описывает вольтамперную характеристику диода [11]. Индекс  $A$  обозначает переменные, относящиеся к антенному элементу (см. обозначения на рис. 1), а величина  $U_A(\tau)$  описывает волну, излучаемую в открытую линию.

Аналогичным образом составляются уравнения для резонансного антенного элемента ( $n = 0$ ) с учетом топологии схемы (рис. 1, а и 1, в). В итоге мы получаем замкнутую систему  $N+1$  дифференциально-разностных уравнений второго порядка, которые описывают эволюцию поля в данном устройстве.

**2. Численные результаты.** Для численного моделирования выбирались такие же параметры устройств, как в работах [9, 13], и использовался метод Дормана-Принса 8-го порядка [12], который мы расширили на случай уравнений с множественными запаздываниями, характерными для нашей задачи. Решения этих нелинейных уравнений являются прямыми вычислениями во

временной области и требуют много машинного времени. Типичные временные последовательности эволюции поля вычислялись в течение многих тысяч периодов колебаний  $T$  с точностью порядка  $\varepsilon = 10^{-7} \dots 10^{-12}$ , достаточной для получения надежных решений, как было проверено тестовым моделированием.

Рассматривая систему с одним активным блоком ( $N = 1$ ), мы обнаружили, что система может генерировать серию высокочастотных импульсов, излученных в открытую секцию микрополосковой линии. Импульсы возбуждаются, когда напряжение смещения  $e_{B_n}$  становится выше порогового значения (система включена) и прекращаются, когда  $e_{B_n}$  становится ниже порога.

Характерной особенностью эффекта является то, что продолжительность импульса  $t_p$  равняется интервалу времени между импульсами  $\Delta t_p$  и каждое из этих значений сравнимо с продолжительностью прохода сигнала от активного блока ( $n = 1$ ) к антенному участку (отдаленному резонатору,  $n = 0$ ) и назад к активному блоку ( $n = 1$ ). Таким образом, пространственная длина каждого импульса в бесконечной микрополосковой линии  $L_p = ct_p$  равна удвоенной длине отрезка линии с активным блоком:  $L_p = 2d_n$ . Несущая частота каждого импульса  $f = \omega / 2\pi$  определяется собственными частотами активного блока и антенного элемента, а оптимальным условием для формирования четкой последовательности импульсов является совпадение собственных частот отдаленного резонатора и активного блока. Длина отрезка микрополосковой линии  $d_n$ , которая обеспечивает запаздывание взаимной связи, должна быть достаточно большой, чтобы значение продолжительности импульса  $t_p$  было намного больше, чем период колебания  $T = 2\pi / \omega$ .

Формирование серии импульсов может быть объяснено следующим образом. В системе с отдаленным антенным элементом сразу после включения внешнего напряжения активный блок начинает функционировать в условиях, как будто антенный элемент отсутствует. Если активный блок спроектирован так, что без антенного элемента в системе существуют автоколебания, то они возбуждаются и по линии передачи к антенному элементу распространяется электромагнитная волна. Колебания продолжают в течение времени  $t_p$  до тех пор, пока к активному блоку не вернется отраженный сигнал от антенного элемента. После этого активный блок и антенный элемент работают как единая система. Если при этом вся система устроена так, что стационарные

автоколебания в ней не поддерживаются, то колебания гасятся и волна, идущая к антенному элементу, практически исчезает. Колебания отсутствуют в течение периода времени  $\Delta t_p$ , пока в активный блок поступает волна, отраженная от узла  $n = 0$ , и, таким образом, активный блок «чувствует» присутствие отдаленного резонатора ( $\Delta t_p = t_p$ ). По истечении этого времени в активный блок поступает отраженная волна, которая имеет практически нулевую амплитуду. Тем самым активный блок вновь оказывается в условиях, когда отдаленный антенный элемент эффективно отсутствует, автоколебания возрождаются, и в системе формируется новый импульс.

Если к узлу антенны подключены две идентичные ветви активных блоков параллельно, мы получаем подобную серию импульсов, которые слегка отличаются по параметрам. С увеличением числа ветвей, колебания между импульсами не прекращаются полностью, и весь процесс усложняется.

На рис. 2 показаны серии высокочастотных импульсов, излученных из системы с одной (кривые 1) и двумя (кривые 2) идентичными ветвями, в которых активные блоки соединены с антенным узлом отрезками микрополосковой линии длиной  $d_n = 200$  (в относительных единицах, где длина волны излучения импульса  $\lambda = 9,0$ ).

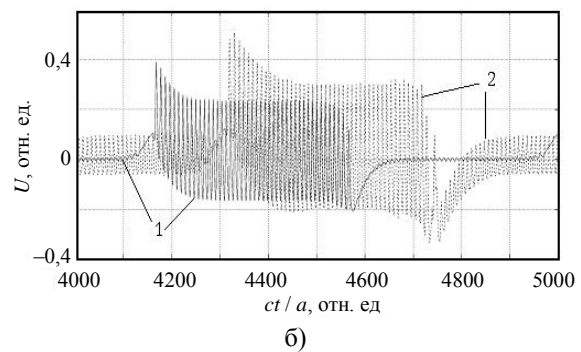
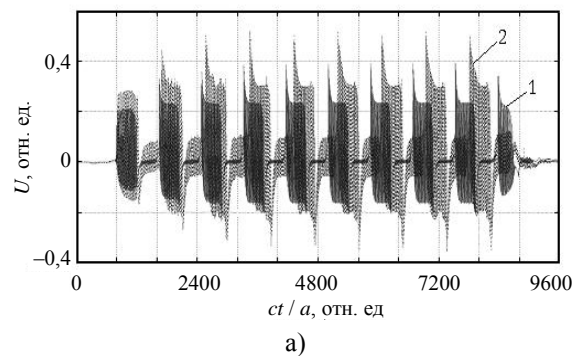


Рис. 2. Серия импульсов излучения из системы с одной (кривые 1) и двумя (кривые 2) ветвями активных блоков: а) – вся серия от момента включения до выключения внешнего напряжения; б) – один из импульсов серии

Частотные параметры активных блоков и антенного элемента выбирались равными  $\omega_L = \omega_{L_A} = 0,1$ ,  $\omega_C = \omega_{C_A} = 10$ , так что их собственные частоты равны  $\omega_0 = \omega_{0_A} = 1$ .

Имея в виду предложенное выше объяснение эффекта, мы можем рассмотреть систему из множественных ветвей с запаздыванием, имеющих разную длину отрезков микрополосковой линии. Учитывая различные времена запаздывания сигналов обратной связи в разных ветвях и нелинейное смещение колебаний в активных блоках, мы можем ожидать возникновения сложных хаотических или квазихаотических колебаний, которые могли бы представлять интерес для радиотехнических приложений [14].

В качестве примера рассмотрим систему, состоящую из двух ветвей таких же идентичных активных блоков, но имеющих различные (желательно несоизмеримые) длины  $d_n$  отрезков микрополосковой линии. В этом случае, несмотря на относительную простоту активной системы, будет наблюдаться сложное смешивание задержек обратной связи в различных ветвях активных блоков. Это, в свою очередь, обеспечит появление сложных (фактически квазихаотических в более низких диапазонах частот) нелинейных колебаний, как показано, например, на рис. 3 (подобный эффект также должен возникнуть в сетях дисперсионных линий передачи из-за различного времени распространения разных частотных компонентов).

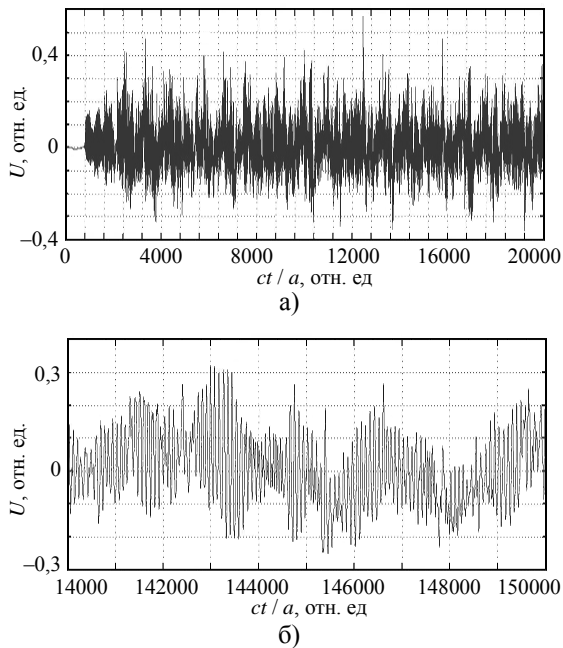


Рис. 3. Квазихаотический сигнал, излученный из системы двух активных блоков, соединенных с узлом антенны отрезками длиной  $d_1 = 200$  и  $d_2 = 266,67$  соответственно (а); детальная структура отрезка сигнала (б)

В этом примере, даже при том, что присутствует определенная несущая частота из-за собственных колебаний активных блоков, форма волны в целом, которая соответствует более низкому диапазону частот по сравнению с несущей частотой, является довольно хаотической и остается таковой в течение длительного периода времени. Здесь мы выбираем параметры длины  $d_1 = 200$  и  $d_2 = 266,67$  в относительных единицах (при этом период основных колебаний составил  $T = 8,6$ ).

Квазихаотический характер сигнала, излученного из системы, хорошо иллюстрирован графиками автокорреляционной функции и сечения Пуанкаре, вычисленных для возникающих колебаний (рис. 4, 5).

Сравнивая автокорреляционные функции (рис. 4) серии импульсов и квазихаотического сигнала, можно видеть длительное сохранение корреляции и ее постепенное периодическое исчезновение и восстановление, обусловленное периодическим повторением импульса (с периодом  $\tau \sim 2t_p \sim 840$  на рис. 4, а), и существенную потерю корреляции в квазихаотическом сигнале за довольно короткое время, немногим превышающее период основных колебаний ( $\tau \sim T = 8,6$ ).

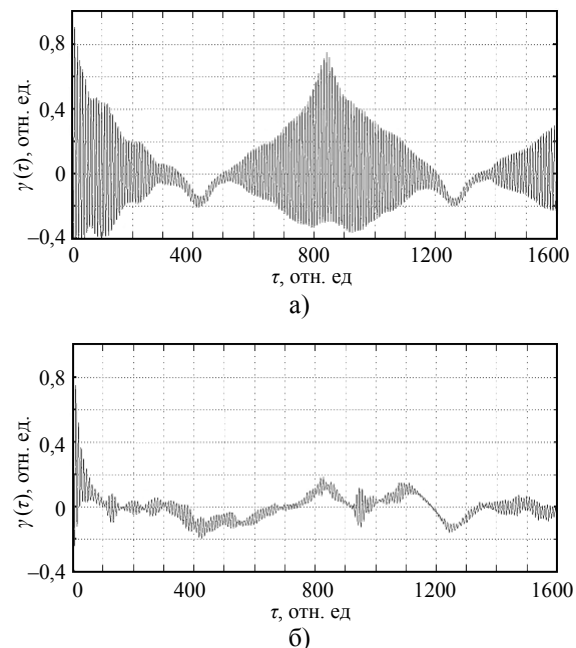


Рис. 4. Автокорреляционная функция: а) – серии импульсов (рис. 2, кривые 1); б) – квазихаотического сигнала (рис. 3), вычисленная за интервал времени  $\tau = 1000-9000$  и  $\tau = 2000-20000$  соответственно

Аналогично на сечениях Пуанкаре (рис. 5) ясно видно наличие периодичности в серии импульсов, соответствующей рис. 2, за длительный период времени и потерю долгосрочной

периодичности в квазихаотическом сигнале, соответствующем рис. 3. Частотный спектр квазихаотического сигнала приведен на рис. 6.

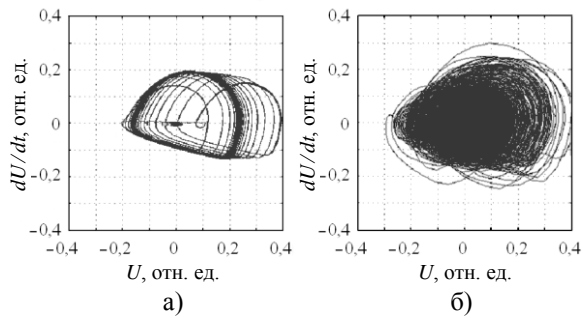


Рис. 5. Сечения Пуанкаре: а) – серии импульсов (рис. 2 кривые 1); б) – квазихаотического сигнала (рис. 3), вычисленные за интервал времени  $\tau = 4000\text{--}8000$

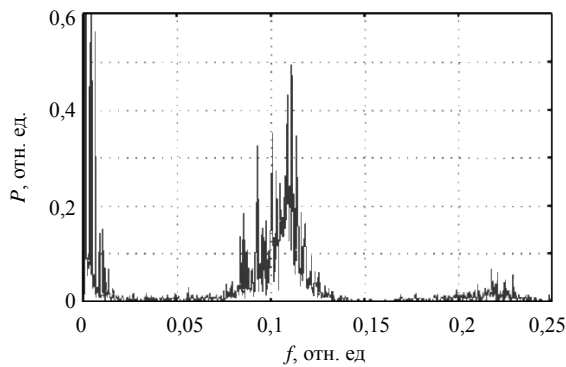


Рис. 6. Спектр мощности квазихаотического сигнала

Для получения коротких импульсов нужно уменьшать длины секций микрополосковых линий. В то же время длительность импульса ограничена снизу периодом собственных колебаний и временем переключения активного блока в разные режимы генерации. При этом могут возникать сложности с возбуждением импульсов малой длительности в укороченных линиях. Пример формирования импульсов в системе с одним активным блоком и микрополосковой секцией длиной  $d = 10$  и  $d = 20$  (в относительных единицах) приведен на рис. 7. Видно, что в системе могут возникать даже очень короткие импульсы, состоящие всего из нескольких колебаний поля. При этом увеличивается интервал между ними по сравнению с тем, который можно было бы ожидать, исходя из длины секции, так как требуется дополнительное время на возбуждение каждого нового короткого импульса.

Серии импульсов, описанные в данной работе, подобны тем, которые моделировались ранее в одномерном открытом резонаторе с тонким диэлектрическим зеркалом [15], где зеркало служило отдаленным компактным резонатором.

В отличие от работы [15], где предполагалась мгновенная реакция активных устройств на внешнее поле, новая модель учитывает собственные частоты активных блоков, что моделирует реально существующее ограничение сверху на максимальную частоту колебаний. С другой стороны, эта модель использует классический  $LC$ -контур вместо диэлектрического зеркала, что демонстрирует общий характер эффекта возбуждения импульсов в системах с отдаленным резонатором. Аналогичный пример появления серии импульсов в системе другого типа (полупроводниковом лазере с задержкой оптической обратной связи) приведен на рис. 8. Несмотря на значительные отличия в устройстве этих систем, наблюдается общность в проявлении данного эффекта.

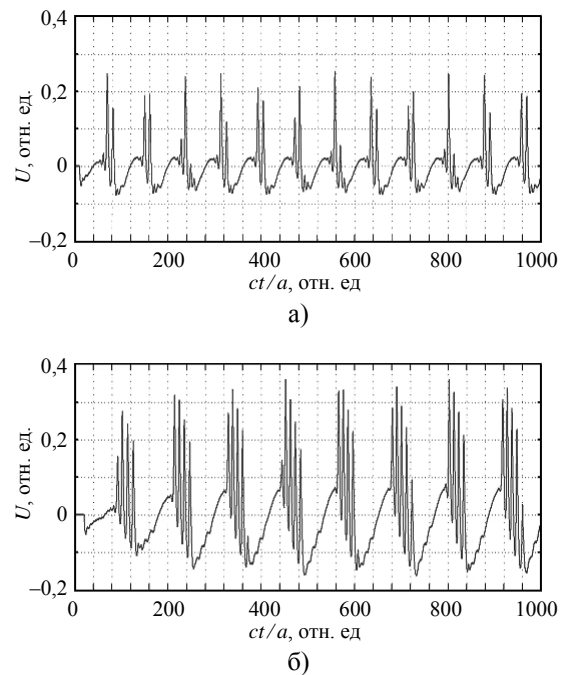


Рис. 7. Серия импульсов излучения из системы с одной ветвью активных блоков: а) –  $d = 10$ ; б) –  $d = 20$



Рис. 8. Серия импульсов излучения, наблюдаемая в полупроводниковом лазере с задержкой оптической обратной связи [16]

**Выводы.** Моделирование во временной области распределенных сетей активных блоков, соединенных отрезками микрополосковой линии

передачи, показало возможность генерации серий высокочастотных импульсов, излученных из открытой секции линии передачи. Серии импульсов могут появиться, когда активные блоки отделены от компактных резонансных участков протяженными секциями линий передачи, обеспечивающих запаздывание обратной связи. Если использовать несколько ветвей активных блоков с различной длиной отрезков линий передачи с запаздыванием, то системой может быть сгенерирован сложный квазихаотический сигнал. Такие системы могут представлять интерес для радиофизических приложений, например, шумовых радаров.

Анализ микроволновых цепей более сложной структуры – с индуктивной связью диодов Ганна с линией задержки, использование другого типа активных приборов, детальное моделирование их внутренней динамики – может прояснить различные нюансы этого эффекта. Подобный анализ мог бы объяснить некоторые другие эффекты, наблюдаемые на практике, например, существенный дрейф частоты в некоторых системах, разрабатываемых для генерации импульсов.

1. Carrara W. G., Goodman R. S., Majewski R. M. Spotlight Synthetic Aperture Radar. Signal processing Algorithms. – London: Artech House, Inc., 1995. – 554 p.
2. Lukin K. A. Noise Radar Technology: the principles and short overview // Applied Radio Electronics. – 2005. – 4, No. 1. – P. 74–79.
3. Kurokawa K. The Single-Cavity Multiple-Device Oscillator // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. – 1971. – MTT-19. – P. 793–801.
4. Russell K. J. Microwave Power Combining Technique // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. – 1979. – MTT-27. – P. 472–478.
5. Erturk V. B., Rojas R. G., Roblin P. Hybrid Analysis: Design Method for Active Integrated Antennas // IEE Proc. Microw. Antennas Propag. – 1999. – 146. – P. 131–137.
6. Vendelin G. D., Pavo A. M., Rohde U. L. Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques. – New-York: Wiley, 2005. – 387 p.
7. Taove A., Hagness S. C. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method. – New York: Artech House, 2000. – 425 p.
8. Yurchenko L. V., Yurchenko V. B. Time-Domain Simulation of Power Combining in a Chain of THz Gunn Diodes in a Transmission Line // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. – 2004. – 25, No. 1. – P. 43–54.
9. Юрченко Л. В., Юрченко В. Б. Генерация многочастотных колебаний в микрополосковых линиях передачи с диодами Ганна // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – № 2. – С. 24–29.
10. Юрченко Л. В., Юрченко В. Б. Моделирование автоколебаний при последовательном включении диодов Ганна в микрополосковую линию // Прикладная радиоэлектроника. – 2007. – 6, № 4. – С. 555–560.

11. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. – М.: Мир, 1991. – 632 с.
12. Hairer E., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems. – Berlin: Springer-Verlag, 1991. – 354 p.
13. Alekseev E., Pavlidis D. GaN Gunn diodes for THz signal generation // IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest. – 2000. – 3. – P. 1905–1908.
14. Lukin K. A., Mogyla A. A., Palamarchuk V. P. et al. Ka-band bistatic ground-based noise waveform SAR for short-range applications // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2008. – 2, No. 4. – P. 233–243.
15. Юрченко Л. В., Юрченко В. Б. Генерация ультракоротких импульсов в резонаторе с активным слоем и диэлектрическим зеркалом // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – 4, № 2. – С. 195–200.
16. Huyet G. Nonlinear dynamics of semiconductor lasers // The Irish Scientists. – 2003. Ireland: <http://www.irishscientist.ie>.

## MODELLING OF GENERATION OF TRAINS OF PULSES IN A PARALLEL CONNECTION OF DELAY LINES WITH GUNN DIODES

L. V. Yurchenko, V. B. Yurchenko

Time-domain modeling of active systems of Gunn diodes connected in parallel with sections of microstrip delay lines has been carried out. Complex dynamics of electromagnetic field radiated into an infinite open section of microstrip line have been observed. In a system with a remote resonator, when active blocks are separated from the resonator by extended sections of microstrip lines, a possibility of generation of trains of high frequency pulses has been shown. Quasi-chaotic signal generation is shown to be possible in a system with parallel connection of a few branches of different length.

**Key words:** high-frequency pulses, Gunn diode, delay line, time delay system.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГЕНЕРАЦІЇ СЕРІЇ ІМПУЛЬСІВ ДІОДАМИ ГАННА В ЛІНІЯХ ЗАТРИМКИ З ПАРАЛЕЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ

Л. В. Юрченко, В. Б. Юрченко

Проведено моделювання в часовому просторі активних систем з діодами Ганна, що з'єднані паралельно відрізками мікросмугової лінії. Знайдено складну динаміку електромагнітного поля, що випромінюється у відкриту секцію мікросмугової лінії. У системі з віддаленим резонатором, коли активні блоки відділені від компактних резонансних пристроїв подовженими секціями мікросмугової лінії, доведено можливість генерції серії високочастотних імпульсів. Доведено, що в системах, які мають декілька паралельних гілок активних блоків різної довжини, можлива генерція складних квазіхаотичних сигналів.

**Ключові слова:** високочастотний імпульс, діод Ганна, лінія затримки, система з запізнюванням.

Рукопись поступила 14 августа 2009 г.