

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электроники, колебаний и волн

Высший Колледж Прикладных Наук

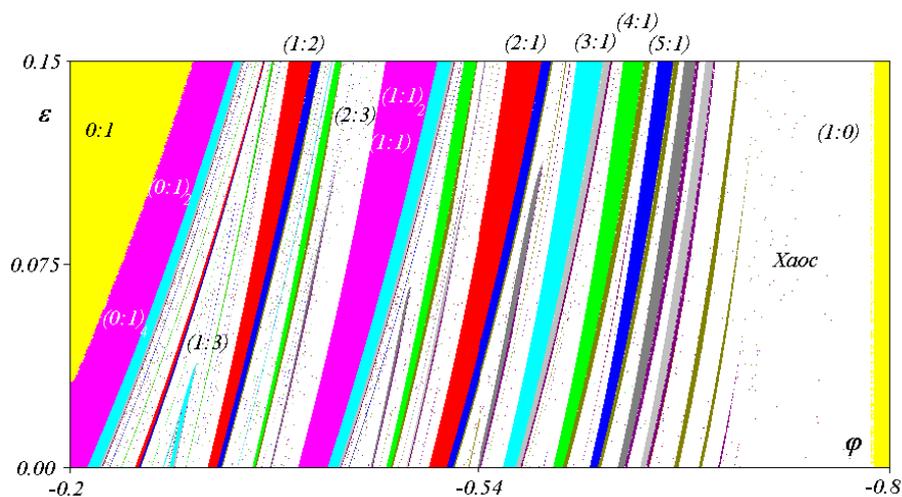
САРАТОВСКИЙ ФИЛИАЛ ИНСТИТУТА РАДИОТЕХНИКИ И
ЭЛЕКТРОНИКИ РАН

Учебно-научная лаборатория «Нелинейная динамика (физический
эксперимент)»

А.А. Короновский, В.И. Пономаренко

МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА С ТУННЕЛЬНЫМ ДИОДОМ

Учебно-методическое пособие



Саратов — 1998

Аннотация

УДК 530.18

Короновский А.А., Пономаренко В.И. Модель генератора с туннельным диодом Учебно-методическое пособие, — Саратов: Издательство ГосУНЦ «Колледж», 1998. — с.

Аннотация

Модель генератора с туннельным диодом представляет собой радиотехническую схему на кусочно-линейном элементе, являющимся аналогом туннельного диода.

Генератор с туннельным диодом является одним из первых генераторов, для которого экспериментально была продемонстрирована возможность получения хаотических колебаний в системах с небольшой размерностью фазового пространства.

В данной работе экспериментально исследуется сложное поведение кусочно-линейного аналога генератора с туннельным диодом на основании анализа фазовых портретов и временных реализаций системы.

Работа предназначена для практических занятий по курсам «Нелинейные колебания», «Динамические системы и бифуркации» и «Динамический хаос» для студентов ВКПН и физического факультета Саратовского университета.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Интеграция», грант № 696.3.

Введение.

В данной лабораторной работе предлагается ознакомиться с механизмом возникновения хаотических колебаний и методами исследования нелинейных динамических систем на примере генератора с туннельным диодом.

Генератор с туннельным диодом является одной из первых радиотехнических моделей, в которых были обнаружены хаотические колебания. Более того, поскольку механизм возникновения детерминированного хаоса в этом генераторе может быть довольно наглядно объяснен на качественном уровне, этот генератор стал классическим образцом радиофизической системы с хаотической динамикой и вошел в учебники по теории колебаний (см., например, [1]). Первоначально, генератор на туннельном диоде был сконструирован, исследован и описан Кияшко С.В., Пиковским А.С. и Рабиновичем М.И. [2], [3], [4]. В натурном и численном экспериментах ими было показано, что в данном генераторе имеют место хаотические колебания. Позднее, в [5] экспериментальным путем была впервые получена подробнейшая карта динамических режимов на плоскости управляющих параметров для генератора с туннельным диодом, показывающая пути возникновения хаоса и закономерности переходов между различными типами сложнопериодических колебаний при изменении управляющих параметров. В [6] было проведено исследование той же системы, с тем лишь отличием, что вместо реального туннельного диода был использован его кусочно-линейный аналог, реализованный с помощью операционных усилителей. В этой работе было показано, что замена нелинейного элемента его кусочно-линейным аналогом не ведет для данной системы к качественному изменению ее динамики.

Генератор с туннельным диодом.

Генератор с туннельным диодом, исследуемый в данной лабораторной работе представляет собой LC -контур с последовательно включенными в него сопротивлением r и туннельным диодом (Рис. 1).

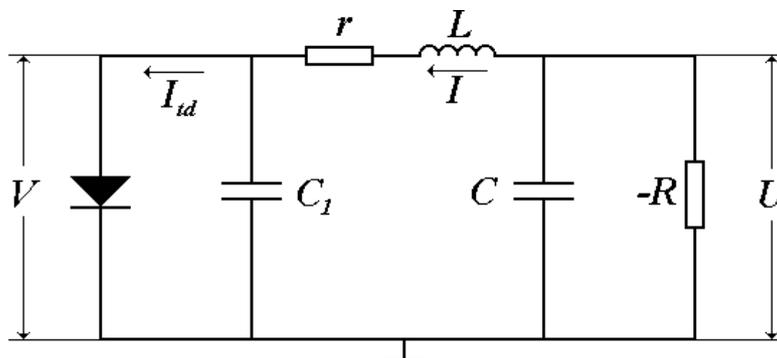


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора на туннельном диоде

Параллельно туннельному диоду включена шунтирующая емкость C_2 , а параллельно емкости C – отрицательное сопротивление $-R$, реализованное с помощью операционного усилителя (Рис. 2), которое является источником энергии для генератора. Управляющими параметрами в данной модели являются шунтирующая емкость C_2 и сопротивление r , которое отвечает за процессы диссипации энергии в системе.

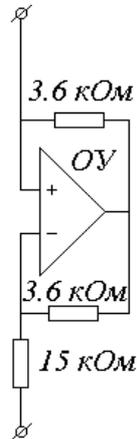


Рис. 2. Отрицательное сопротивление $-R$, реализованное с помощью операционного усилителя

Динамика генератора с туннельным диодом описывается тремя нелинейными обыкновенными дифференциальными уравнениями, полученными на основе законов Кирхгофа:

$$L \frac{dI}{dt} = -Ir + U - V,$$

$$C \frac{dU}{dt} = -I - \frac{U}{R}, \quad (1)$$

$$C_1 \frac{dV}{dt} = I - I_{td}(V),$$

где $I_{td}(V)$ определяет вольт-амперную характеристику (ВАХ) туннельного диода (См. Рис. 3). Как известно, вольт-амперная характеристика туннельного диода представляет собой N -образную нелинейность с падающим участком, который и определяет особенности поведения системы.

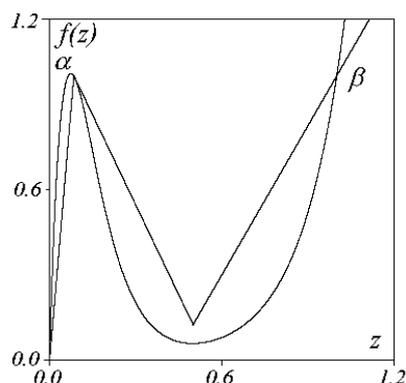


Рис. 3. Безразмерная вольт–амперная характеристика туннельного диода и ее кусочно-линейная аппроксимация

Нетрудно понять, что данная система обладает полутора степенями свободы и поэтому ее фазовое пространство будет трехмерным: по его осям будут отложены ток через индуктивность L , напряжение на конденсаторе C и напряжение на шунтирующем конденсаторе C_1 . В моменты времени, когда система находится на α -ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода (См. Рис. 3), в среднем, за единицу времени, в колебательный контур LC от источника $-R$ поступает большее количество энергии, чем рассеивается на диссипативных элементах, и амплитуда колебаний в контуре нарастает. В то же самое время, ток через туннельный диод возрастает, а напряжение на емкости C_1 , шунтирующей туннельный диод, изменяется незначительно (почему?). Следовательно, поведению генератора в фазовом пространстве соответствует спираль, раскручивающаяся в плоскости «ток через индуктивность L – напряжение на конденсаторе C ». Понятно, что соотношение между получаемой и рассеиваемой энергией зависит от выбора значений параметров системы, прежде всего сопротивления r и отрицательного сопротивления $-R$, а следовательно, от значений этих параметров зависит также и время нахождения системы на α -ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода. Чем больше будет значение параметра диссипации r , тем более длительное время будет раскручиваться спираль фазовой траектории в плоскости (I, U) .

После того, как амплитуда колебаний в контуре LC нарастает до определенной величины, соответствующей точке переключения туннельного диода, система переходит на β -ветвь вольт-амперной характеристики, напряжение на емкости C_1 возрастает, что соответствует выходу фазовой траектории из плоскости «ток через индуктивность L – напряжение на конденсаторе C » в фазовое пространство. Соответственно, потери в системе возрастают, энергия, рассеиваемая в контуре, оказывается больше энергии, поступающей в колебательный контур, амплитуда колебаний уменьшается, система переходит на α -ветвь вольт-амперной характеристики туннельного диода, а фазовая траектория возвращается в плоскость (I, U) , после чего все повторяется сначала. Времена, в течение которых система находится на α - и β -ветвях вольт-амперной характери-

стики туннельного диода, определяются значениями параметров системы; соответственно, в зависимости от соотношения этих времен, в генераторе могут реализовываться как периодические колебания, когда фазовая траектория, возвращаясь в плоскость (I, U) , попадает в свой «хвост», так и хаотические колебания, при которых фазовая траектория каждый раз возвращается в новую точку плоскости (I, U) .

Совершенно очевидно, что необходимо каким-либо образом классифицировать режимы, реализующиеся в данной системе при различных значениях управляющих параметров. Периодические режимы удобно классифицировать с помощью соотношения двух целых чисел $(m:n)$, как это было сделано, например, в работе [5]: первое число m соответствует целому числу витков фазовой траектории, лежащих в плоскости «ток через индуктивность L – напряжение на конденсаторе C », а второе число n – числу витков траектории, выходящих из плоскости (I, U) в пространство (I, U, V) .

Плоскость управляющих параметров (r, C_1) оказывается разделенной на характерные зоны колебаний, каждая из которых содержит области как периодического, так и хаотического поведения. Переход от периодических колебаний к хаотическим внутри зон происходит с увеличением параметра r по сценарию Фейгенбаума через каскад бифуркаций удвоения периода. Внутри области хаотических движений существуют узкие окна, в которых реализуются периодические колебания с большими периодами.

При рассмотрении поведения генератора на всей плоскости управляющих параметров (r, C_1) можно выявить следующие закономерности: с увеличением параметра r зоны колебаний повторяют друг друга с тем отличием, что при переходе от одной зоны к другой, фазовый портрет приобретает дополнительный оборот в плоскости (I, U) (вполне понятно, что система с большими потерями дольше раскачивается до установления порогового значения тока I_m через туннельный диод, при котором происходит переход системы с одной ветви характеристики на другую). Так, с увеличением значения параметра диссипации r последовательно сменяют друг друга зоны колебаний, соответствующие базовым режимам $(0:1)$, $(1:1)$, $(2:1)$, $(3:1)$ и т.д. Таким образом, при переходе от зоны к зоне, происходит добавление периода на единицу, зоны по мере увеличения параметра r становятся все более узкими, а эквидистантный спектр субгармоник сменяется другим эквидистантным спектром с числом субгармоник, большим на единицу.

Увеличение емкости C_1 приводит к постепенному сближению зон колебаний и смещению их в сторону больших значений параметра диссипации r . При этом на плоскости управляющих параметров образуются складки, что соответствует неоднозначному поведению генератора: при одних и тех же значениях управляющих параметров в системе могут существовать, в зависимости от начальных условий, различные колебательные режимы.

Как уже было отмечено выше, замена туннельного диода на кусочно-линейный аналог не ведет к качественным изменениям динамики системы. В то же самое время, результаты численного моделирования безразмерных уравнений

$$\frac{dx}{d\tau} = 2\delta x + y - gz,$$

$$\frac{dy}{d\tau} = x - \frac{1}{2\lambda}y, \quad (2)$$

$$\varepsilon \frac{dz}{d\tau} = x - f(z),$$

полученных из (1), хорошо соответствуют результатам натуральных экспериментов как для генератора с туннельным диодом, так и для генератора с кусочно-линейным аналогом туннельного диода. В (2) $\tau = \frac{t}{\sqrt{LC}}$ – безразмерное время, а

$$x = \frac{I}{I_m}, \quad y = \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{U}{I_m}, \quad z = \frac{V}{V_m}. \quad (3)$$

Безразмерные параметры δ , ε , λ , γ выражаются через размерные следующим образом:

$$\delta = -\frac{r}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad g = \frac{V_m}{I_m} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad \lambda = -\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad \varepsilon = g \frac{C_1}{C}. \quad (4)$$

Размерные параметры I_m , U_m , которые задействованы в соотношениях (2), (3), (4) – это характерные нормирующие величины тока и напряжения для туннельного диода. Безразмерный параметр g определяет степень влияния туннельного диода на процессы, протекающие в контуре, ε – параметр, пропорциональный паразитной емкости туннельного диода (и дополнительной емкости) C_1 , δ и λ – параметры, определяющие соответственно диссипацию и подкачку энергии соответственно. Безразмерная кусочно-линейная аппроксимация туннельного диода была выбрана в виде

$$f(z) = \begin{cases} 11.765z, & z \leq 0.085, \\ 1 - 2.108(z - 0.085), & 0.085 < z \leq 0.5, \\ 0.125 + 1.75(z - 0.5), & z > 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

Дискретное отображение как модель потоковой системы.

Стоит отметить, что описание нелинейной системы с помощью дифференциальных уравнений, как это было описано выше, не единственно возможный способ: хорошо себя зарекомендовало в теории динамических систем описание нелинейных объектов с помощью дискретных отображений. Этот подход имеет ряд преимуществ, к которым, прежде всего, относятся простота и быстро-

та анализа дискретных отображений по сравнению с анализом потоковых систем. Более того, динамика дискретных отображений, как правило, более понятна и наглядна, чем поведение потоковой системы. Вследствие этого, понять сущность процессов, происходящих в системе, гораздо проще на основе дискретного отображения, нежели системы нелинейных дифференциальных уравнений. К сожалению, несмотря на всю привлекательность и продуктивность этого метода, не существует каких-либо общих формальных рецептов, каким образом можно перейти от потоковой системы к дискретному отображению, записанному аналитически в явном виде, хотя иногда для отдельных потоковых систем такой переход осуществить удается, как это было сделано, например в [7] для неавтономного релаксационного генератора, когда поведение системы удалось описать с помощью несколько модифицированного отображения окружности на себя. Как правило, переход к отображениям возможен при определенных допущениях, сужающих область рассмотрения систем.

Возможен еще один подход к описанию потоковых систем с помощью отображений, когда отображения не выводятся аналитически, а «конструируются», исходя из каких-либо соображений, основанных на анализе поведения системы. Безусловно, при таком подходе можно говорить, прежде всего, о качественном подобии исходной системы и полученного отображения, но, тем не менее, этот способ дает иногда хорошие результаты (См., например, [8]).

Для генератора с туннельным диодом также оказалось возможным описать его динамику с помощью дискретных отображений, полученных из исходных дифференциальных уравнений [9,10,11]: раскручивание системы на одной ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода, скачкообразный переход на другую ветвь и последующее возвращение в состояние, близкое к первоначальному. Впоследствии, в [12] удалось «сконструировать» отображение, динамика которого качественно соответствует поведению генератора с туннельным диодом на всей плоскости управляющих параметров.

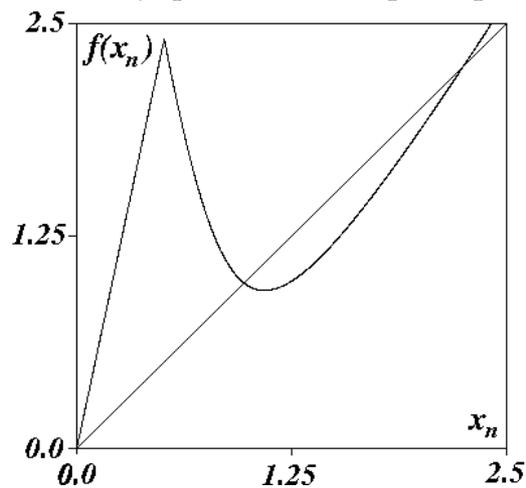


Рис. 4. Отображение (6) для угла поворота $\varphi = -0.2$ ($\varepsilon = 0.05$)

В качестве базового было выбрано отображение, предложенное в [10], затем, оно было аппроксимировано явно заданной непрерывной функцией, зави-

сящей от двух параметров таким образом, чтобы при изменении значений этих параметров построенное отображение демонстрировало динамику, аналогичную динамике генератора с кусочно-линейным аналогом туннельного диода:

$$x_{n+1} = f_{\varphi}(\varepsilon, x_n). \quad (6)$$

Сущность этого отображения заключается в том, что одним из параметров, от которых зависит отображение, является угол поворота φ графика отображения относительно какой-либо опорной точки (в данном случае относительно начала координат $(0; 0)$). Для «нулевого» угла поворота описываемое отображение (см. Рис. 4) имеет вид

$$\begin{aligned} f_0(\varepsilon, x) = & y_1(x)\sigma(y_2(\varepsilon, x) - y_1(x)) + \\ & + y_2(\varepsilon, x)\sigma(y_1(x) - y_2(\varepsilon, x)), \end{aligned} \quad (7)$$

где функции $y_1(x)$, $y_2(\varepsilon, x)$ определены как

$$y_1(x) = 125x, \quad (8)$$

$$y_2(\varepsilon, x) = 2.85\sqrt{(0.45 + \varepsilon)^2 + (x - 0.85)^2} - 0.3, \quad (9)$$

а

$$\sigma(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{1}{2} & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (10)$$

функция Хевисайда. Несмотря на сложный вид отображения (7), принцип, по которому это отображение устроено, довольно прозрачен: (8) описывает линейный участок отображения, который соответствует нахождению потоковой системы на α -ветви характеристики кусочно-линейного аналога туннельного диода, (9) представляет собой ветвь гиперболы и соответствует нахождению генератора на β -ветви характеристики, а (10) «сшивает» $y_1(x)$ и $y_2(\varepsilon, x)$ в точке их пересечения и обеспечивает непрерывность функции (7). Численные значения в соотношениях (8), (9) подобраны таким образом, чтобы обеспечить сходство динамики отображения и исходной потоковой системы.

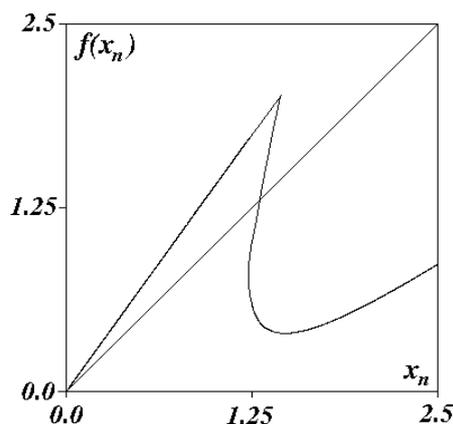


Рис. 5. Отображение (6) для угла поворота $\varphi = -0.5$ ($\varepsilon = 0.05$). Видно, что функция $f_\varphi(\varepsilon, x)$ становится неоднозначной

Теперь, для того, чтобы получить одномерное отображение $f_\varphi(\varepsilon, x)$ при другом значении параметра φ , необходимо осуществить поворот графика отображения $f_0(\varepsilon, x)$ на этот угол φ относительно начала координат. В соответствии с общепринятой терминологией, угол поворота φ считается положительным, если вращение осуществляется против часовой стрелки. Ясно, что для любого угла поворота $\varphi \neq 0$ отображение $f_\varphi(\varepsilon, x)$ в явном виде (в общем случае) записано быть не может. Более того, при поворотах на угол φ ($\varphi < 0$, $|\varphi| > |\varphi^*|$),

$$\varphi^* = -\text{arccctg} \left(\lim_{x \rightarrow +x^*} \frac{\partial f_0(x, \varepsilon)}{\partial x} \right), \quad (11)$$

где x^* определяется из соотношения $y_1(x^*) = y_2(x^*)$, функция $f_\varphi(\varepsilon, x)$ становится неоднозначной (см. Рис. 5). В этом случае возможно:

1. Исследовать поведение $f_\varphi(\varepsilon, x)$ как поведение отображения с гистерезисом.
2. Рассматривать поведение $f_\varphi(\varepsilon, x)$ как однозначного отображения, выбрав какую-либо одну ветвь функции, как было сделано в данном случае: если для отображения $f_\varphi(\varepsilon, x)$ при некотором значении x возможно два значения $f_\varphi(\varepsilon, x)$, соответствующие ветвям $y_1(x)$ и $y_2(\varepsilon, x)$, то в качестве значения $f_\varphi(\varepsilon, x)$ выбирается минимальное значение, соответствующее ветви $y_2(\varepsilon, x)$. Подобный выбор ветви отображения обусловлен видом одномерного отображения, полученного из численного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику генератора с кусочно-линейным аналогом туннельного диода (см. [6]).

Поскольку говорится, что отображение (6) должно быть в какой-то мере аналогично генератору с туннельным диодом, то возникает вполне резонный во-

прос: какая физическая сущность стоит за «поворотом» графика отображения, и изменению какого параметра потоковой системы соответствует изменение угла поворота φ . Понятно, что поскольку туннельный диод (или его кусочно-линейный аналог) является единственным нелинейным элементом в генераторе, то все особенности поведения потоковой системы в значительной мере определяются свойствами этого нелинейного элемента. Ясно, что дискретное отображение должно нести на себе отпечаток нелинейного элемента системы. И, по сути дела, так оно и происходит, достаточно лишь взглянуть на график отображения (см. Рис. 4), чтобы увидеть сходство между этим отображением и вольт-амперной характеристикой туннельного диода. Если в качестве переменной, на основании наблюдений за которой будет строиться одномерное отображение, выбрать значение тока, протекающего через диод (неважно, туннельный ли диод или его аналог), то одномерное отображение, иллюстрирующее зависимость, скажем, локального максимума значения тока на n -ом шаге от максимального значения на предыдущем ($n-1$) шаге, будет качественно повторять ВАХ диода.

Одним из главных управляющих параметров в генераторе с кусочно-линейным аналогом туннельного диода является величина сопротивления r , включенного, по сути дела, последовательно с диодом (см. Рис. 1). Тогда диод и линейное сопротивление r можно рассматривать как один нелинейный элемент, вольт-амперная характеристика которого при $r=0$ совпадает с ВАХ диода (который, однако, имеет свое собственное сопротивление). В свою очередь, вид отображения (6) тогда будет определяться характеристикой именно этого «виртуального» нелинейного элемента. Как же будет трансформироваться ВАХ этого элемента с увеличением значения сопротивления r ? Нетрудно видеть, что с ростом величины сопротивления r , ВАХ будет поворачиваться по часовой стрелке (Следовательно, угол поворота φ должен быть отрицательным) и искажаться. Поскольку речь идет всего лишь о качественном соответствии поведения отображения динамике рассматриваемой системы, в первом приближении можно пренебречь искажением вольт-амперной характеристики нелинейного элемента (состоящего из диода и резистора), а, следовательно, и искажением отображения (6), и предположить, что именно поворот является основным доминирующим фактором, определяющим свойства отображения системы. Естественно, это всего лишь предположение, но оно оправдывается с хорошей степенью точности.

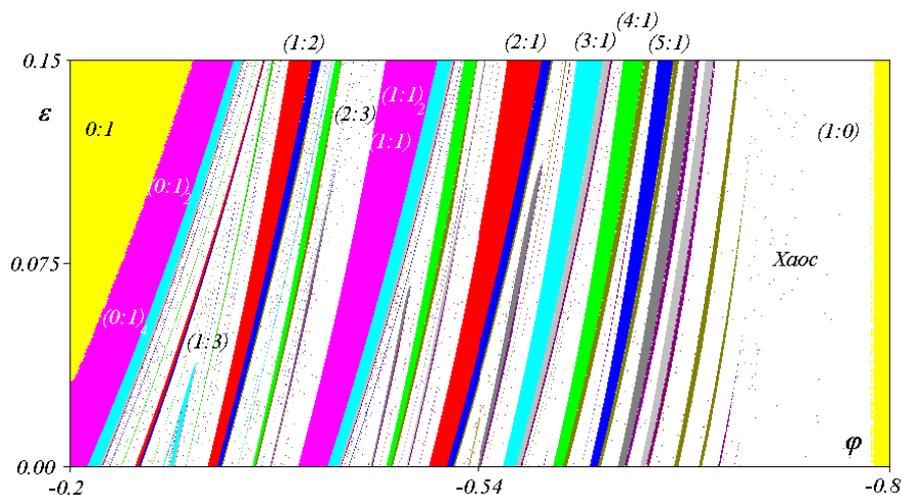


Рис. 6. Карта режимов для отображения (6), построенная на плоскости управляющих параметров (φ ; ε). Поскольку изменению сопротивления r в генераторе с кусочно-линейным аналогом туннельного диода соответствует нелинейное изменение угла поворота φ , на карте режимов параметр φ отложен в нелинейном масштабе

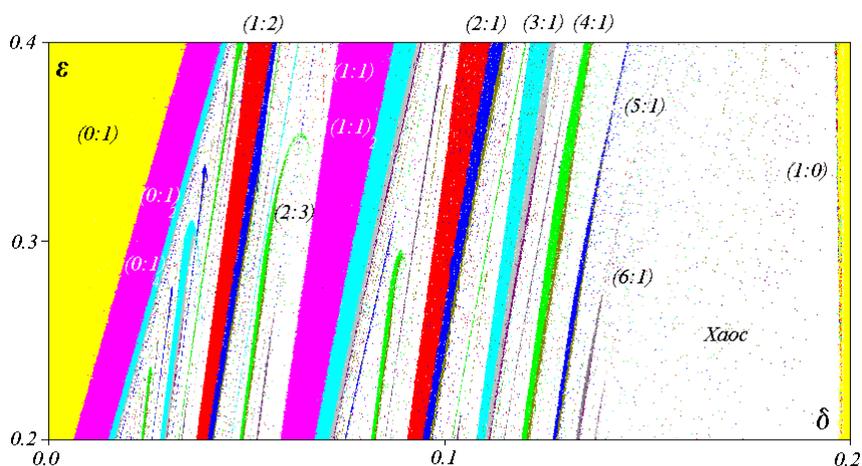


Рис. 7. Карта режимов колебаний генератора с кусочно-линейным аналогом туннельного диода на плоскости управляющих параметров δ и ε , полученная в ходе численного эксперимента. Параметр δ является, фактически, безразмерным сопротивлением r

По аналогии с классификацией режимов генератора с кусочно-линейным аналогом туннельного диода (См. [6]), колебательные режимы идентифицируются с помощью двух целых чисел $(m:n)$. Первое число m обозначает число точек последовательности $\left\{x_k\right\}_{k=1}^{n+m}$, лежащих на линейном участке отображения (6), и соответствует полному числу оборотов фазовой траектории в плоско-

сти (I, U) для генератора с туннельным диодом. Число n , в свою очередь, определяется числом точек из последовательности $\{x_k\}_{k=1}^{n+m}$ (которая является, фактически, периодом колебаний дискретного отображения), которые лежат на втором участке отображения (6), и соответствует полному числу витков фазовой траектории аттрактора, выходящих в пространство, для генератора с туннельным диодом.

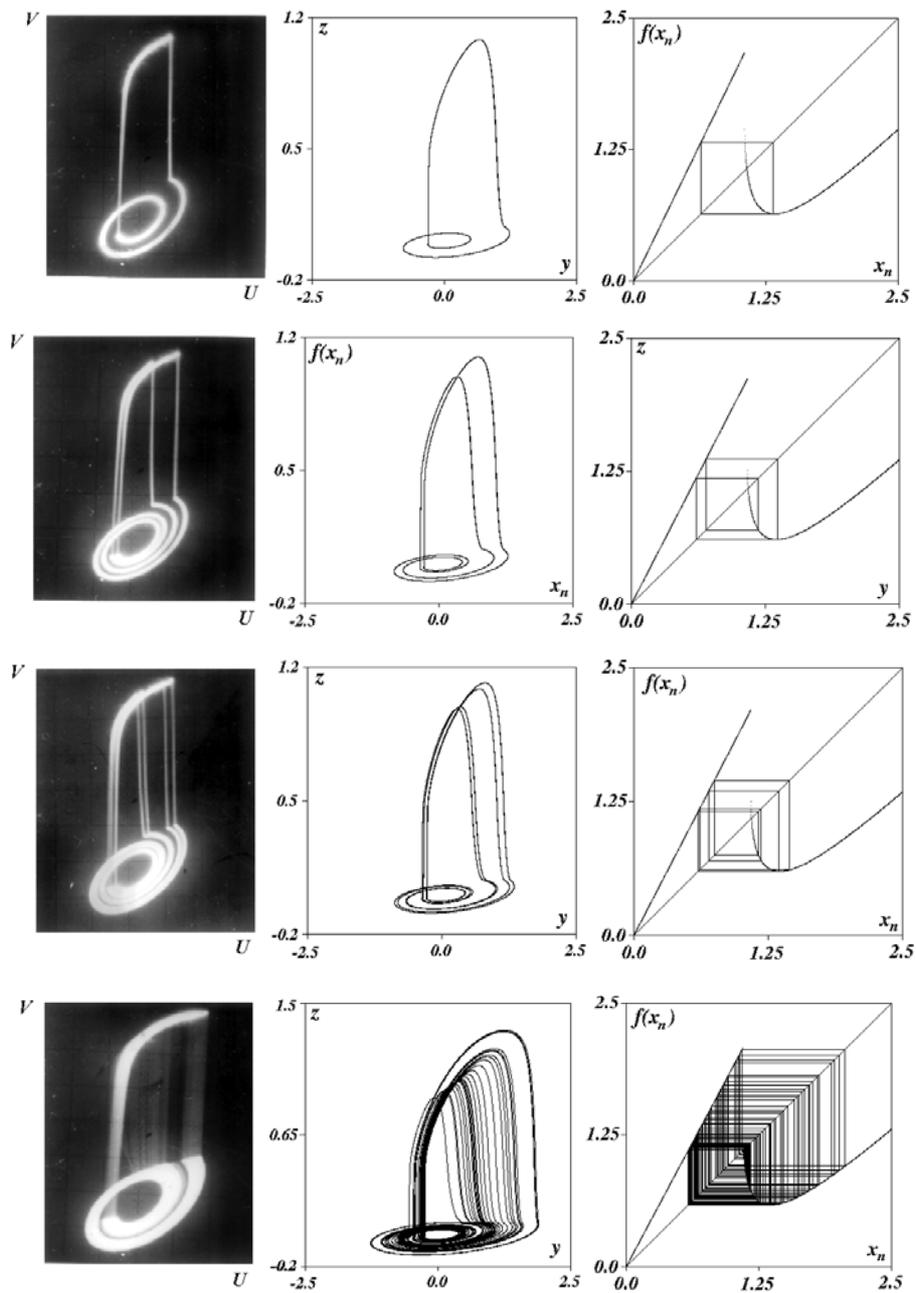


Рис. 8. Фазовые портреты поведения генератора с кусочно-линейным аналогом туннельного диода; переход к хаосу на базе режима $(1:1)$: а) натурный эксперимент; б) численный эксперимент ($\varepsilon=0.2$) $(1:1)$ $\delta=0.06$, $(1:1)_2$ $\delta=0.069$, $(1:1)_4$ $\delta=0.0705$, $(1:1)_{\text{хаос}}$ $\delta=0.078$; в) одномерное отображение

($\varepsilon=0.05$): $(1:1)$ $\varphi=-0.442$, $(1:1)_2$ $\varphi=-0.464$, $(1:1)_4$ $\varphi=-0.469$, $(1:1)_{\text{хаос}}$
 $\varphi=-0.479$

Отображение (6) хорошо описывает динамику генератора на всей плоскости управляющих параметров: на Рис. 6 приведена карта режимов на плоскости управляющих параметров для отображения (6), а на Рис. 7 – аналогичная карта режимов для генератора с кусочно-линейным аналогом туннельного диода, полученная численным моделированием системы уравнений (2). Рис. 8 иллюстрирует переход от периодических колебаний к хаотическим через каскад бифуркаций удвоения периода для натурального эксперимента (генератор с кусочно-линейным аналогом туннельного диода), численного моделирования системы уравнений (2) и дискретного отображения (6).

Описание измерительной установки .

Измерительная установка включает в себя исследуемый объект и осциллограф для наблюдения временных реализаций и фазовых портретов.

Соедините выходы V , U экспериментальной модели с соответствующими входами осциллографа.

Включите осциллограф и экспериментальную модель тумблерами «Сеть».

Двухлучевой осциллограф позволяет наблюдать временные реализации напряжений, либо фазовый портрет (в зависимости от режима работы).

Величины управляющих параметров определяют по шкалам R и C_1 в соответствии с градуировочными кривыми.

Методика исследования и экспериментальное задание.

1. Экспериментально определите величину сопротивления r , при которой амплитуда колебаний в LC -контуре достигает порогового значения, соответствующего переключению туннельного диода с α -ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода на β -ветвь.
2. Изменяя значения величин управляющих параметров r и C_1 , получите периодические колебания в генераторе, соответствующие режиму $(1:1)$. Плавно изменяя величину сопротивления r , пронаблюдайте переход от периодических колебаний к хаотическим через каскад бифуркаций удвоения периода. Зарисуйте фазовые портреты, спектры колебаний и осциллограммы напряжения на туннельном диоде для режима $(1:1)$ и всех режимов, рожденных на его базе, в том числе и для режима хаотических колебаний.
3. Пронаблюдайте явление добавления периода при изменении параметра диссипации r . Для этого найдите на плоскости управляющих параметров (r, C_1) область, в которой реализуются периодические колебания типа $(0:1)$, и плавно увеличивайте величину сопротивления r . Зарисуйте фазовые портреты, спектры колебаний и осциллограммы напряжения на туннельном диоде $V(t)$ для режимов $(i:1)$ $i = \overline{0, 1, \dots, n}$. Объясните полученные результаты.
4. Найдите, изменяя значения управляющих параметров r и C_1 , область на карте режимов, в которой реализуются периодические колебания с большим периодом. Зарисуйте фазовый портрет, спектр колебаний и осциллограмму напряжения на туннельном диоде $V(t)$ для данного режима.

5. Исследуйте режимы хаотических колебаний, рожденные на базе периодических режимов (0:1), (1:1) и (4:1). Ответьте на вопрос: «Отличаются ли хаотические колебания, рожденные на базе различных периодических режимов?»
6. В диапазоне значений управляющих параметров, указанных преподавателем, постройте на плоскости (r, C_1) карту режимов генератора.

Меры предосторожности и безопасности

Основным источником опасности в работе являются розетки и провода сети 220 В, а также части измерительных приборов, скрытые под корпусами, находящиеся при высоких напряжениях. Как в типичном случае работы с электроприборами, при выполнении экспериментальных заданий следует работать одной рукой и не допускать контакта с заземленными предметами. При обнаружении нарушений в корпусах приборов, отсоединения заземляющих проводников или других нарушений установки следует работу прекратить и сообщить о неполадках преподавателю.

Контрольные вопросы.

1. Получите систему дифференциальных уравнений (1), описывающих динамику генератора с туннельным диодом.
2. Почему, когда система находится на α -ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода, ток через туннельный диод с течением времени возрастает, а напряжение на емкости C_1 , шунтирующей туннельный диод, изменяется незначительно?
3. Почему, когда система переходит на β -ветвь вольт-амперной характеристики туннельного диода, в системе возрастают потери?
4. Отличаются ли хаотические колебания, рожденные на базе различных периодических режимов?
5. Получите безразмерные уравнения (2), описывающие динамику системы, из размерных уравнений (1).
6. Каким образом было получено отображение (6)? Благодаря чему стало возможным описание потоковой системы на языке дискретных отображений?
7. Основываясь на графическом рассмотрении, получите выражение (11) и объясните его смысл.
8. Как Вы будете определять величину сопротивления r , при которой амплитуда колебаний в LC -контуре достигает порогового значения, соответствующего переключению туннельного диода с α -ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода на β -ветвь (см. первое задание к эксперименту)?

Список литературы.

1. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука. 1984
2. Pikovsky A.S., Rabinovich M.I. Stochastic oscillations in dissipative systems.// *Physica* 1981. Vol. 2D. PP. 8-24.
3. Рабинович М.И. Стохастические автоколебания и турбулентность.// *УФН*. 1978. Т. 125. С. 123-168.
4. Пиковский А.С. О статистических свойствах простейшей модели стохастических автоколебаний.//
5. Андрушкевич А.В., Кипчатов А.А. Хаос и периодичность в генераторе на туннельном диоде.// *Изв. Вузов. Радиофизика*. 1990. Т. 33. N. 4. С. 431–434.
6. Андрушкевич А.В., Кипчатов А.А., Красичков Л.В., Короновский А.А. Путь к хаосу в кусочно-линейной модели генератора на туннельном диоде.// *Изв. Вузов. ПНД*. 1993. Т. 1. N. 1, N. 2. С. 93–103.
7. Кипчатов А.А., Подин С.В. Исследование поведения неавтономного релаксационного генератора в пространстве параметров.// *Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 1996. Т. 4. N 4,5. С. 30.
8. Bezruchko V.P., Prokhorov M.D., Zhalin A.U. Map modelling of nonautonomous LR-diode circuit complicated behaviour.// *Proc. Of the 5th International Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. NDES'97. Moscow. Russia. 26-27 June. 1997. P. 431.*
9. Пиковский А.С., Рабинович М.И. Простой генератор со стохастическим поведением.// *ДАН СССР*. 1978. Т. 239. N 2. С. 301.
10. Кияшко С.В., Пиковский А.С., Рабинович М.И. Автогенератор радиодиапазона со стохастическим поведением.// *РЭ*. 1980. Т. 25. С. 336.
11. Баженов М.В., Рабинович М.И., Кияшко С.В. Хаотическая динамика простой электронной схемы (лабораторная работа).// *Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 1994. Т. 2. N 2. С. 81-100.
12. Короновский А.А. Дискретное отображение – аналог потоковой системы.// *Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 1998. Т. 6. N 1. С. 122-130.