

ГЕНЕРАТОР ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ РАДИОДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С 2.5 СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Е.В. Ефремова, Н.В. Атанов, Ю.А. Дмитриев

Предлагается генератор хаоса радиодиапазона на основе биполярного транзистора. Исследуется математическая модель генератора – автоколебательная система с 2.5 степенями свободы. Анализируется динамика генератора в пакете схемотехнического моделирования Advanced Design System (ADS) с использованием параметров реального транзистора, моделирование генератора осуществляется с учетом свойств подложки. Результаты моделирования в ADS сопоставляются с экспериментальными данными. Показывается, что использование пакета ADS для анализа генератора и учет влияния топологии платы и характеристик материала макета позволяют максимально приблизить результаты моделирования к эксперименту.

Введение

При реализации беспроводных коммуникационных систем на основе хаотических сигналов ключевым моментом является создание генераторов хаоса, которые обеспечивают заданные выходные характеристики колебаний, в том числе спектральные, автокорреляционные и энергетические, а также являются достаточно технологичными, с точки зрения производства и настройки [1-3].

Для таких приложений, как сверхширокополосные локальные сети и сенсорные сверхширокополосные сети, основным требованием к генератору является формирование сигнала в заданной полосе частот с равномерным спектром и определенной спектральной плотностью мощности.

Принципиальная возможность формирования заданного спектра сигнала в генераторах хаоса существует для генераторов на основе кольцевых автоколебательных систем, для которых разработана соответствующая теория формирования спектра хаотического сигнала [4, 5]. Однако в них используются нелинейные элементы с характеристикой, имеющей падающий участок, а также буферные каскады между элементами цепи. Это усложняет схему генератора и затрудняет его реализацию в радиочастотном и СВЧ диапазонах. Существует так же значительное количество конструкций генераторов хаоса, выполняемых с помощью микрополосковой технологии [1, 3, 6]. К сожалению, их широкое использование затруднено из-за значительных габаритов, сложности настройки и, как следствие, высокой стоимости.

Таким образом, если речь заходит о компактных, прецизионных устройствах радиочастотного и СВЧ диапазона с воспроизводимыми характеристиками, а также о возможной последующей реализации их в виде микрочипов, то становится ясно, что целесообразно использовать генераторы на сосредоточенных элементах с биполярным или полевым транзистором в качестве активного элемента. В ряду других причин, делающих такие генераторы привлекательными, с точки зрения их применения в коммуникационных системах, необходимо выделить следующие.

Биполярный транзистор – типичный, широко распространенный электронный элемент, относительно легко реализуемый в радиочастотном и СВЧ диапазонах. Известен также ряд низкочастотных транзисторных осцилляторов, демонстрирующих хаотические колебания, и некоторые из них позволяют управлять формой спектра мощности колебаний [7-11]. Так, в работе [11] предложен подход к построению генераторов хаоса на основе единственного транзистора и пассивного четырехполюсника, замкнутых в цепь обратной связи, и показано, что путем подбора параметров пассивного четырехполюсника можно формировать спектр мощности выходного сигнала генератора.

В данной статье рассматривается один из генераторов этого класса. Математическая модель генератора вводится в первом разделе и описывается пятью дифференциальными уравнениями первого порядка. Во втором разделе статьи исследуются динамические процессы в этой модели. Это исследование является необходимым предварительным этапом для изучения динамических свойств генератора в области радиочастот.

Для анализа динамики генератора на высоких частотах недостаточно просто пересчитать параметры его математической модели. На высоких частотах все без исключения элементы генератора – транзистор, емкости, индуктивности, резисторы – представляют собой достаточно сложные динамические системы, которые должны быть адекватно введены в модель генератора, если нужно получить соответствие между поведением модели и физического устройства. Кроме того, должно быть учтено влияние подложки и ее топологии.

Такое, адекватное в области радиочастот моделирование проводится в третьем разделе статьи с помощью специального пакета схемотехнического моделирования Advance Design System (ADS).

В четвертом разделе статьи описывается макет генератора хаоса, спектр мощности сигнала которого сосредоточен в области частот $100 \div 500$ МГц, анализируется его поведение в зависимости от значений параметров входящих в него элементов и приводятся экспериментальные результаты.

Непосредственные измерения спектра мощности колебаний и их формы не всегда обеспечивают полное понимание явлений в генераторе. Однако следует отметить, что современные цифровые осциллографы позволяют оцифровывать и сохранять достаточно длинные серии данных даже в области радиочастот. Эти данные затем могут быть обработаны в соответствии с процедурами, принятыми при анализе нелинейных процессов. В пятом разделе статьи таким образом производится восстановление аттракторов, соответствующих колебаниям в генераторе, и расчет их корреляционной размерности.

Наконец, в Заключении экспериментальные результаты сравниваются с расчетными и делаются выводы.

1. Математическая модель генератора

Рассмотрим генератор, схема которого приведена на рис. 1. Генератор состоит из активного элемента – биполярного транзистора и пассивного четырехполюсника, замкнутых в цепь обратной связи.

Динамика математической модели генератора описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} C_0 \dot{V}_{CE} &= I_1 - I_C, \\ L_1 \dot{I}_1 &= V_1 - V_{CE} - R_1 I_1, \\ C_1 \dot{V}_1 &= I_2 - I_1, \\ L_2 \dot{I}_2 &= V_C - V_1 - R_2 I_2 + V_{BE}, \\ C_2 \dot{V}_{BE} &= (V_E - V_{BE})/R_E - I_2 - I_B, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_{CE} , V_{BE} – напряжения коллектор – эмиттер и база – эмиттер; V_1 – напряжение на емкости C_1 ; I_1 , I_2 , I_C , I_B – токи через индуктивность L_1 , индуктивность L_2 , коллектор С и базу В.

Введем замену переменных: $V_A = V_1 - V_{BE}$. Такая замена эквивалентна измерению напряжения в точке А относительно земли. Система дифференциальных уравнений (1) теперь принимает вид

$$\begin{aligned} C_0 \dot{V}_{CE} &= I_1 - I_C, \\ L_1 \dot{I}_1 &= V_A + V_{BE} - V_{CE} - R_1 I_1, \\ C_1 \dot{V}_A &= I_2 - I_1 - \frac{C_1}{C_2} ((V_E - V_{BE})/R_E - I_2 - I_B), \\ L_2 \dot{I}_2 &= V_C - V_A - R_2 I_2, \\ C_2 \dot{V}_{BE} &= (V_E - V_{BE})/R_E - I_2 - I_B. \end{aligned} \quad (2)$$

Для описания работы транзистора в модели используем кусочно-линейную аппроксимацию статической вольт-амперной характеристики транзистора

$$\begin{aligned} I_B &= 0, \text{ если } V_{BE} \leq V_T, \\ I_B &= (V_{BE} - V_T)/R_{BE}, \text{ если } V_{BE} > V_T, \\ I_C &= \beta I_B, \end{aligned} \quad (3)$$

где V_T – барьерный потенциал (примерно 0.75 В), R_{BE} – сопротивление перехода база – эмиттер, β – коэффициент усиления транзистора.

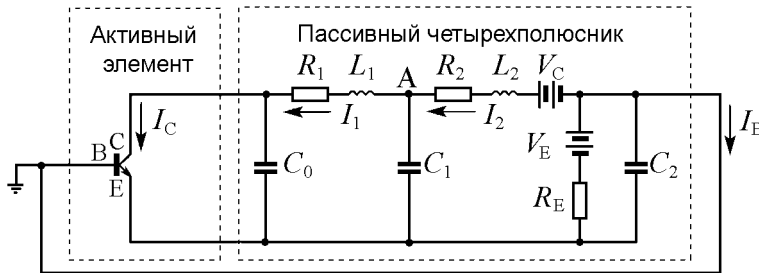


Рис. 1. Схема генератора с 2.5 степенями свободы

В безразмерной форме уравнения модели имеют вид

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{CE} &= \frac{1}{\omega_0 C_0 R_{BE}} (i_1 - i_C), \\
\dot{i}_1 &= \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_1} \left(v_A + v_{BE} - v_{CE} - \frac{R_1}{R_{BE}} i_1 \right), \\
\dot{v}_A &= \frac{1}{\omega_0 C_1 R_{BE}} \left(-\frac{R_{BE}}{R_E} (v_E - v_{BE}) + i_B + \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) i_2 - \frac{C_2}{C_1} i_1 \right), \\
\dot{i}_2 &= \frac{R_{BE}}{\omega_0 L_2} \left(v_C - v_A - \frac{R_2}{R_{BE}} i_2 \right), \\
\dot{v}_{BE} &= \frac{1}{\omega_0 C_2 R_{BE}} \left(\frac{R_{BE}}{R_E} (v_E - v_{BE}) - i_2 - i_B \right),
\end{aligned} \tag{4}$$

где нелинейность $i_B(v_{BE})$

$$i_B(v_{BE}) = \begin{cases} 0, & \text{если } v_{BE} \leq 1, \\ v_{BE} - 1, & \text{если } v_{BE} > 1, \end{cases} \tag{5}$$

а связь между нормированными переменными и параметрами с исходными переменными и параметрами задается соотношениями $d/dt' = \omega_0 d/dt$, $v_{CE} = V_{CE}/V_T$, $v_{BE} = V_{BE}/V_T$, $v_A = V_A/V_T$, $i_1 = I_1/I_0$, $i_2 = I_2/I_0$, $v_E = V_E/V_T$, $v_C = V_C/V_T$, $I_0 = V_T/R_{BE}$, $i_C = \beta i_B(v_{BE})$, $\omega_0 = \sqrt{(C_0 + C_1)/(L_1 C_0 C_1)}$.

2. Динамика генератора с кусочно-линейной вольт-амперной характеристикой транзистора

В случае использования кусочно-линейной аппроксимации вольт-амперной характеристики поведение генератора описывается двумя системами линейных дифференциальных уравнений, одна из которых определяет его динамику в области $V_{BE} \leq 1$, а другая – в области $V_{BE} > 1$. Модель генератора (4) обладает двумя точками равновесия. Точка равновесия в области $V_{BE} \leq 1$ имеет координаты $O_1[v_E + v_C, 0, v_C, 0, v_E]$. Координаты точки равновесия в области $v_{BE} > 1$ $O_2 \left[v_C + \frac{R_{BE} v_E + R_E (\beta + 1)}{R_{BE} + R_E (\beta + 1)} - \frac{\beta (R_1 + R_2) (v_E - 1)}{R_{BE} + R_E (\beta + 1)}, \frac{\beta R_{BE} (v_E - 1)}{R_{BE} + R_E (\beta + 1)}, v_C - \frac{\beta R_2 (v_E - 1)}{R_{BE} + R_E (\beta + 1)}, \frac{\beta R_{BE} (v_E - 1)}{R_{BE} + R_E (\beta + 1)}, \frac{R_{BE} v_E + R_E (\beta + 1)}{R_{BE} + R_E (\beta + 1)} \right]$.

Моделирование системы проводилось при следующих значениях параметров: $L_1 = L_2 = 10$ нГн, $C_0 = C_1 = C_2 = 15$ пФ, $R_E = 200$ Ом, $R_1 = R_2 = 10$ Ом, $R_{BE} = 290$ Ом, $\beta = 425$, которые определялись из требований к частотному диапазону генерации колебаний и реализации развитого хаоса.

Точка равновесия O_1 (в области $v_{BE} \leq 1$) устойчива: все собственные значения имеют отрицательные действительные части ($\mu_{1,2} = -0.1446 \pm 1.2173i$; $\mu_{3,4} = -0.1600 \pm 0.6972i$; $\mu_5 = -0.0297$). Точка равновесия O_2 (в области $v_{BE} > 1$) имеет двумерное неустойчивое многообразие ($\mu_{1,2} = 0.8247 \pm 1.0073i$) и трехмерное устойчивое многообразие ($\mu_{3,4} = -0.5107 \pm 1.6504i$; $\mu_5 = -1.3299$).

Модель генератора обладает интересным свойством, заключающимся в том, что при $v_E > 1$ в ней возбуждаются хаотические колебания сразу, без промежуточных бифуркаций, как показано на рис. 2, на котором изображена диаграмма зависимости режимов работы автономного генератора при разных напряжениях источника питания на эмиттере v_E . С ростом v_E амплитуда этих колебаний растет пропорционально разности $(v_E - 1)$, однако структура колебаний и их характеристики не меняются.

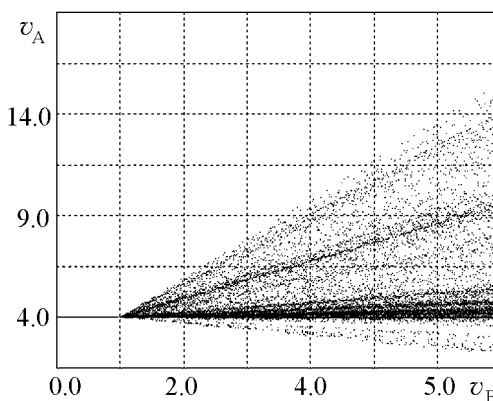


Рис. 2. Зависимость режимов генератора от параметра v_E

Для того чтобы понять поведение системы, рассмотрим эволюцию фазового пространства системы с изменением параметра v_E . Как отмечалось выше, динамика системы описывается двумя

линейными системами уравнений, первая из которых описывает поведение системы в одной области фазового пространства, а вторая – в другой. Эти области разделены гиперплоскостью и вместе покрывают все фазовое пространство.

Каждая линейная, рассматриваемая отдельно, система имеет единственное положение равновесия, которое перемещается по фазовому пространству при изменении v_E . При этом тип точки равновесия каждой из систем не меняется и, более того, не меняются собственные значения этих точек. У одной системы (для определенности, первой) положение равновесия устойчиво, а у второй – представляет собой седло-фокус с неустойчивым двумерным многообразием и трехмерным устойчивым многообразием.

Каждая из систем отвечает за динамику модели генератора в своей области «ответственности». При $v_E < 1$ положения равновесия обеих систем лежат в области, где «работает» первая система. Поэтому в модели генератора имеется единственное положение равновесия и оно устойчиво.

С увеличением v_E положения равновесия обеих систем смещаются к границе раздела «ответственности». При $v_E = 1$ их местоположение в фазовом пространстве совпадает, а затем они вновь расходятся за счет разной скорости смещения по отношению к изменению v_E . При $v_E > 1$ точки равновесия обеих систем находятся в области «ответственности» второй линейной системы. Поэтому в модели генератора снова имеется единственное положение равновесия, но теперь уже неустойчивое, типа седло-фокус. При выбранных значениях параметров за точкой перехода реализуется хаотический режим со старшим ляпуновским показателем $\lambda = 0.06$.

Рассматриваемая система инвариантна к некоторой линейной замене переменных. Поэтому с дальнейшим ростом v_E сохраняется тот же топологический тип хаотического режима. Это хорошо видно из рис. 3, где приведены проекции фазовых портретов для двух различных значений v_E . Структура этих фазовых портретов одинакова и они отличаются друг от друга только размером.

Форма сигнала и его спектр мощности сильно зависят от выбора точки схемы, в которой снимается сигнал или, если речь идет о математической модели генератора, от выбора анализируемой переменной. Как было показано в [11], форма

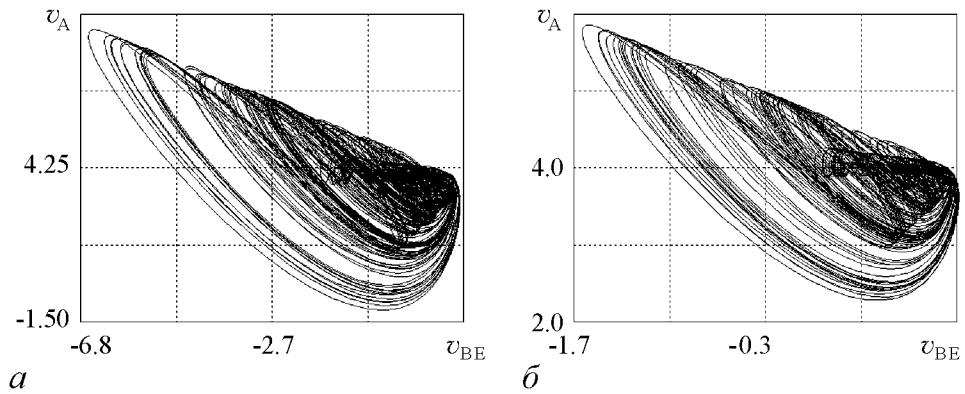


Рис. 3. Двумерные проекции фазового портрета аттрактора системы по переменным v_A , v_{BE} при $v_C = 3$, $v_E = 1.5$ (а), $v_E = 3.0$ (б)

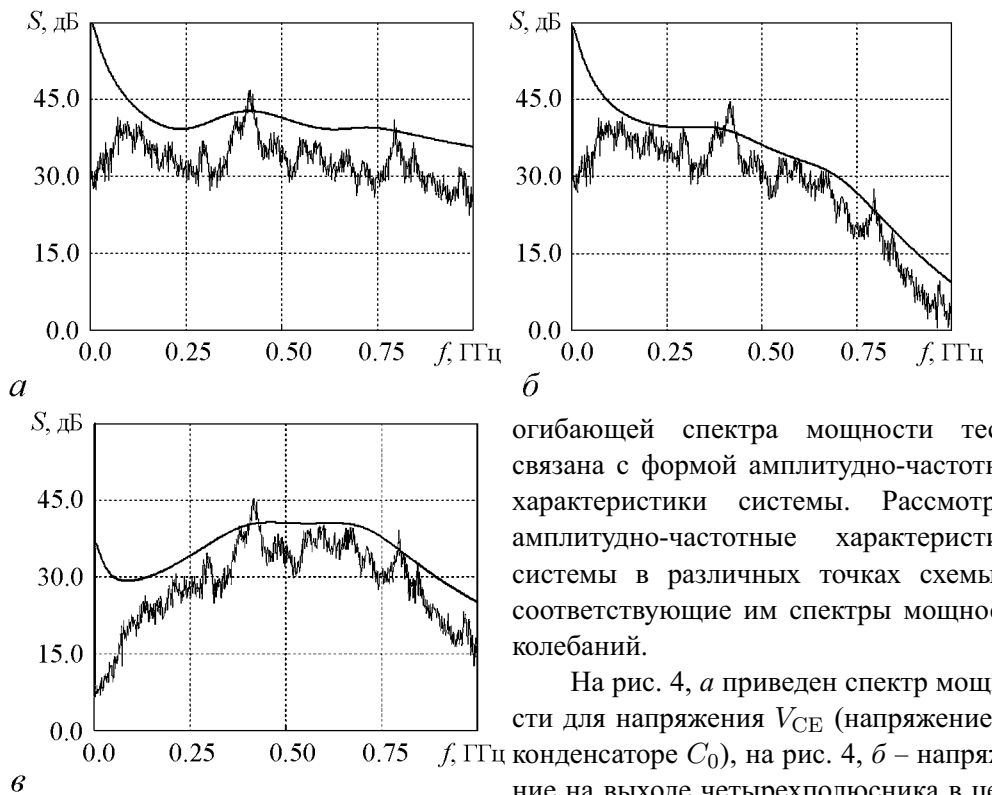


Рис. 4. Спектр мощности сигнала генератора, измеренного в различных точках схемы: а – спектр мощности напряжения коллектор – эмиттер V_{CE} ; б – спектр мощности напряжения база – эмиттер V_{BE} ; в – спектр мощности напряжения V_A в точке А

амплитудно-частотные характеристики системы в соответствующих точках. Как видно из рис. 4, в, в системе с 2.5 степенями свободы можно получить колебания, спектр мощности которых близок к полосовому.

Для дальнейших исследований был выбран сигнал в точке А, поскольку у него основная спектральная мощность сосредоточена в ограниченной полосе, что существенно для коммуникационных приложений.

огигающей спектра мощности тесно связана с формой амплитудно-частотной характеристики системы. Рассмотрим амплитудно-частотные характеристики системы в различных точках схемы и соответствующие им спектры мощности колебаний.

На рис. 4, а приведен спектр мощности для напряжения V_{CE} (напряжение на конденсаторе C_0), на рис. 4, б – напряжение на выходе четырехполюсника в цепи обратной связи V_{BE} (напряжение на конденсаторе C_2), наконец, на рис. 4, в показан спектр мощности сигнала в точке А (напряжение в точке А относительно земли). На этих же рисунках приведены

3. Моделирование генератора в пакете ADS

Когда речь идет о высокочастотных устройствах, упрощенной математической модели оказывается недостаточно для адекватного описания динамики системы. В этом случае элементы генератора представляют собой сложные динамические системы, которые должны описываться более точными моделями, учитывающими высокочастотные эффекты. Например, биполярный транзистор должен описываться многомерной динамической системой типа модели Гуммеля – Пуна [12]. Поэтому исследование динамики генератора с помощью математической модели (2)-(4) рассматривалось как предварительное, а само моделирование в радиочастотном диапазоне производилось с помощью программного пакета схемотехнического моделирования – Advanced Design System (ADS).

Разработка модели для симуляций в пакете ADS заключается в сборке схемы генератора на экране монитора, выборе типа транзистора, указании значений параметров резисторов, емкостей и индуктивностей. Далее производится конкретизация моделей используемых активных и пассивных элементов либо с помощью библиотек пакета, либо непосредственно по данным, предоставляемым производителями элементов.

Схема генератора, использованная при моделировании в ADS, отличалась от рассмотренной ранее схемы на рис. 1 наличием блокировочной емкости $C_{\text{блок}} = 100$ пФ и нагрузки $R_{\text{вых}} = 50$ Ом на выходе системы. Блокировочная емкость введена для того, чтобы избавиться от постоянной составляющей в спектре выходного сигнала, а модельная нагрузка призвана учесть входное сопротивление реальной нагрузки в экспериментальном макете.

При моделировании в ADS в качестве биполярного транзистора использовался транзистор BFP620 фирмы Infineon Technologies. Рабочий диапазон этого транзистора простирается до 70 ГГц. Схемотехническая ADS-модель транзистора в корпусе изображена на рис. 5, где В, С и Е обозначают базу, коллектор и эмиттер, соответственно. Параметры элементов схемы приведены в табл. 1.

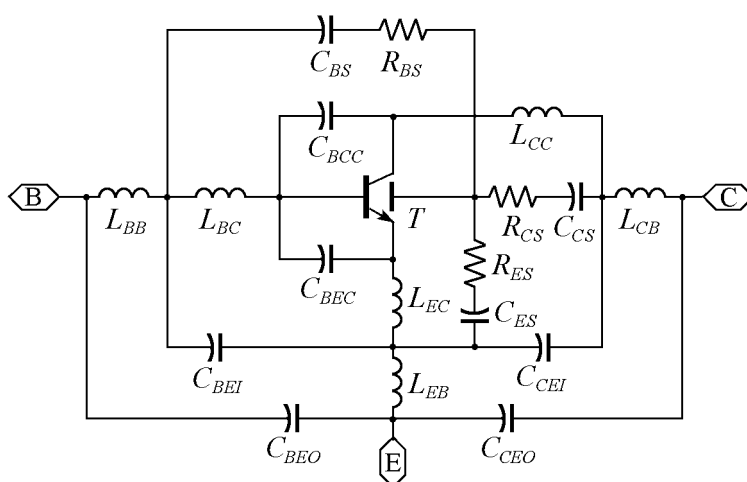


Рис. 5. Модель транзистора в корпусе

Таблица 1

Параметры элементов схемы
транзистора BFP620 в корпусе

| | | |
|---------------------|----------------------|--------------------|
| $L_{BC} = 60$ пГ | $C_{BEC} = 98.4$ фФ | $R_{BS} = 1200$ Ом |
| $L_{CC} = 50$ пГ | $C_{BCC} = 55.9$ фФ | $R_{CS} = 1200$ Ом |
| $L_{EC} = 15$ пГ | $C_{ES} = 140$ фФ | $R_{ES} = 300$ Ом |
| $L_{BB} = 764.5$ пГ | $C_{BS} = 54$ фФ | |
| $L_{CB} = 725.4$ пГ | $C_{CS} = 50$ фФ | |
| $L_{EB} = 259.6$ пГ | $C_{CEO} = 106.5$ фФ | |
| | $C_{BEO} = 106.7$ фФ | |
| | $C_{CEI} = 132.4$ фФ | |
| | $C_{BEI} = 99.6$ фФ | |

Для моделирования работы транзистора в ADS была использована модель Гуммеля – Пуна [12]. Параметры модели приведены в табл. 2. Таким образом, при переходе к моделированию в ADS модель генератора превращается из системы, описываемой пятью дифференциальными уравнениями 1-го порядка, в многомерную динамическую систему, описываемую десятками дифференциальных уравнений.

Таблица 2

Параметры модели Гуммеля – Пуна для транзистора BFP620

| | | | | | | | | |
|---|---------|----------|-------|-----------|----------|-------|-------|----------|
| SPICE Parameter (Gummel-Poon Model, Berkley-SPICE 2G.6 Syntax): | | | | | | | | |
| Transistor Chip Data: | | | | | | | | |
| IS= | 0.22 | fA | BF= | 425 | - | NF= | 1.025 | - |
| VAF= | 1000 | V | IKF= | 0.25 | A | ISE= | 21 | fA |
| NE= | 2 | - | BR= | 50 | - | NR= | 1 | - |
| VAR= | 2 | - | IKR= | 10 | mA | ISC= | 18 | pA |
| NC= | 2 | - | RB= | 3.129 | Ω | IRB= | 1.522 | mA |
| RBM= | 2.707 | Ω | RE= | 0.6 | - | RC= | 2.364 | Ω |
| CJE= | 250.7 | fF | VJE= | 0.75 | V | MJE= | 0.3 | - |
| TF= | 1.43 | ps | XTF= | 10 | - | VTF= | 1.5 | V |
| ITF= | 2.4 | A | PTF= | 0 | deg | CJC= | 124.9 | fF |
| VJC= | 0.6 | V | MJC | 0.5 | - | XCJC= | 124.9 | fF |
| TR= | 0.2 | ns | CJS= | 128.1 | fF | VJS= | 0.52 | V |
| MJS= | 0.5 | - | NK= | -1.42 | - | EG= | 1.078 | eV |
| XTI= | 3 | - | FC= | 0.8 | | TNOM | 298 | K |
| AF= | 2 | - | KF= | 7.291E-11 | | | | |
| TITF1 | -0.0065 | - | TITF2 | 1.0E-5 | | | | |

В математической модели генератора (2) хаотические колебания в системе существуют при любых значениях напряжения на эмиттере, превышающих пороговое значение $V_T = 0.75$ В. С увеличением напряжения на эмиттере меняется толь-

ко амплитуда колебаний в системе. Это явление связано с особенностью кусочно-линейной характеристики, использованной для описания работы транзистора. Однако при использовании модели Гуммеля – Пуна зависимость режимов генератора от величины напряжения на эмиттере становится значительно более сложной (рис. 6, а). С ростом напряжения на эмиттере в генераторе возникают автоколебания, затем происходит несколько бифуркаций удвоения периода колебаний, и система переходит в режим хаотических колебаний. При дальнейшем увеличении напряжения чередуются окна периодических колебаний различных периодов и хаоса.

Соответствующая бифуркационной диаграмме эволюция спектров мощности показана на рис. 7. С точки зрения создания генератора с заданным возможно более равномерным спектром мощности, наибольший интерес представляет область значений напряжения от 2.1 до 3.7 В, для которой характерны спектры мощности, приведенные на рис. 7, д, е.

При работе на высоких частотах помимо номиналов радиотехнических элементов, из которых состоит электрическая схема, большое влияние на режимы ра-

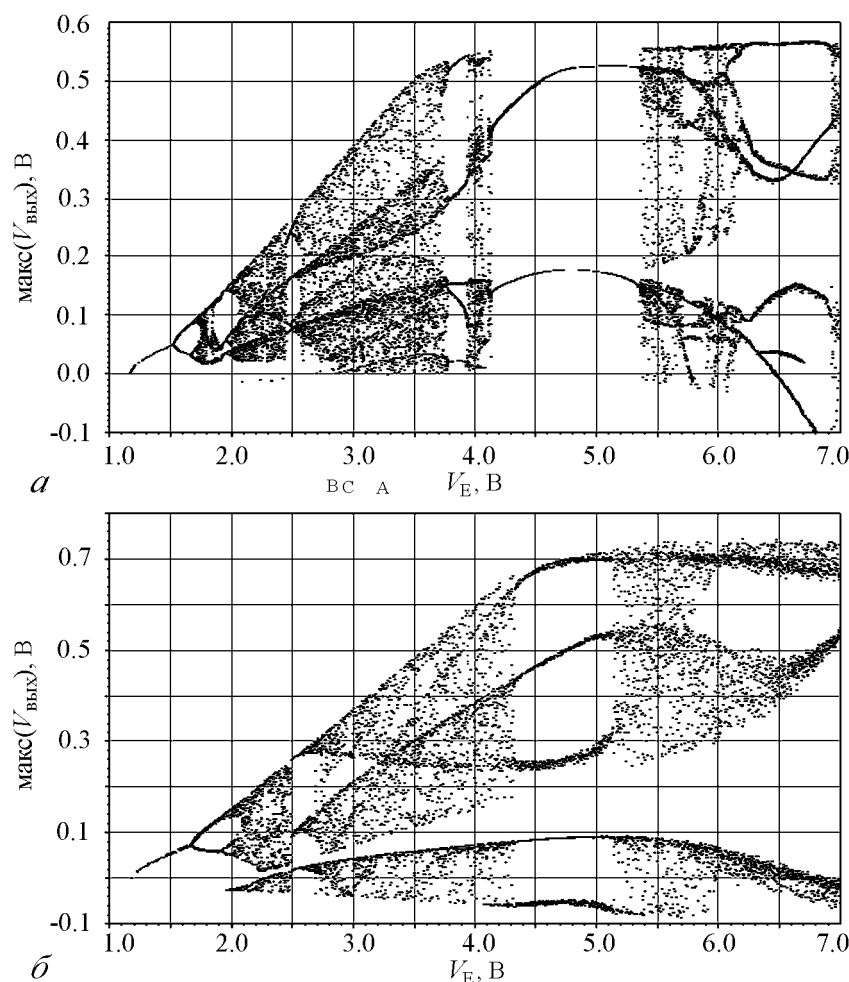


Рис. 6. Зависимость режимов генератора от параметра V_E . Моделирование в ADS (а) без учета подложки, (б) с учетом подложки

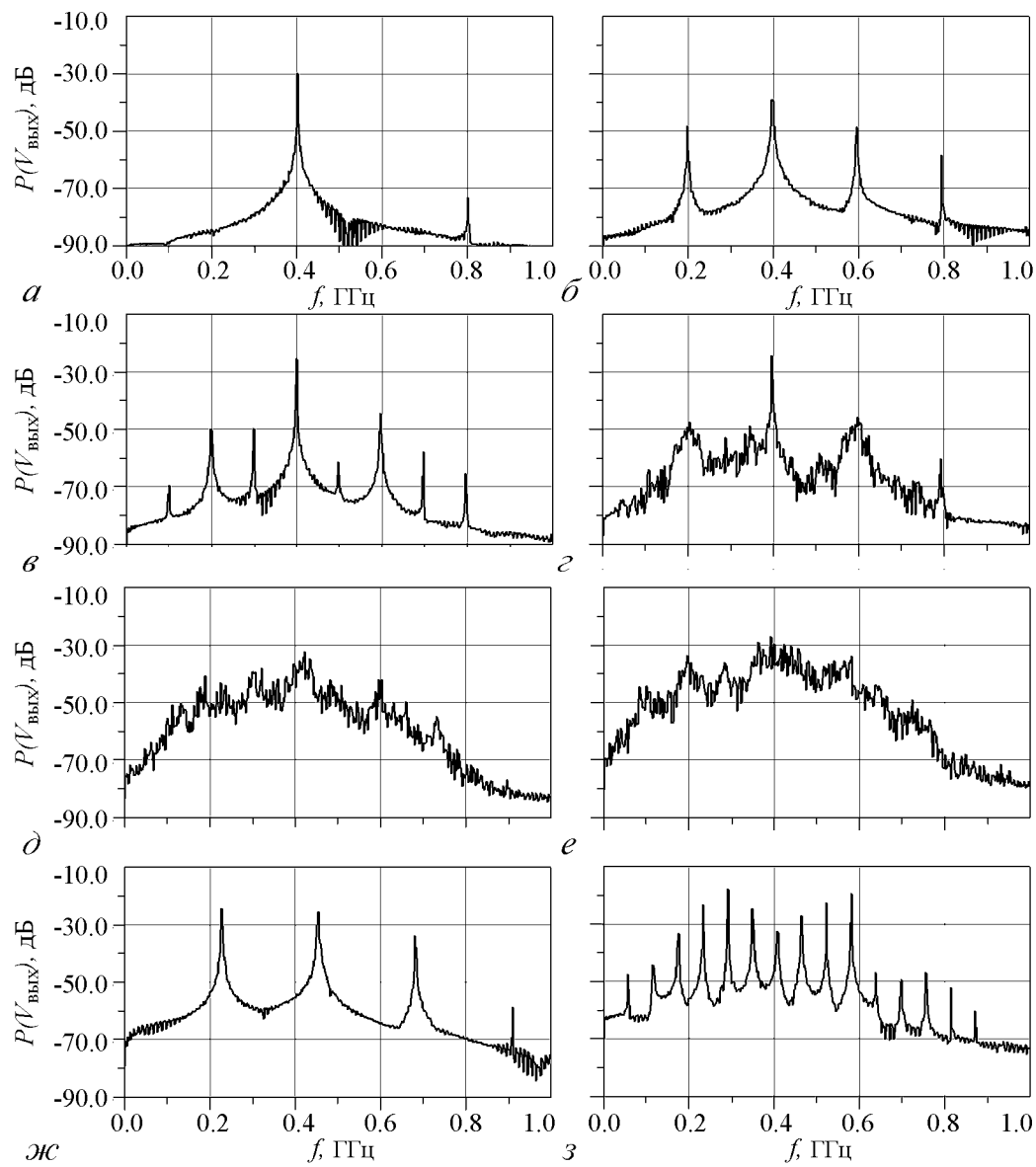


Рис. 7. Спектр мощности на выходе генератора. Моделирование без учета подложки $V_C = 3$ В; V_E (В): а - 1.4, б - 1.6, в - 1.7, г - 1.77, д - 2.4, е - 3.5, ж - 5.0, з - 6.0

боты оказывает материал диэлектрической подложки и топологическая структура металлизированных площадок платы, на которой производится монтаж устройства. Пакет ADS предоставляет возможность учесть влияние упомянутых факторов на динамику генератора.

Для экспериментальной реализации макета генератора была разработана структура платы, показанная на рис. 8. В качестве подложки был выбран материал FR-4 со значением диэлектрической проницаемости 4.8, тангенсом угла диэлектрических потерь 0.018 и толщиной 1 мм. С помощью пакета ADS было проведено моделирование динамики системы, учитывающее топологию и материал платы.

На рис. 6, б приведена бифуркационная диаграмма режимов системы при изменении напряжения на эмиттере для модели с учетом топологии. Соответствующие спектры мощности сигнала на выходе системы при различных значениях V_E приведены на рис. 9. Анализ рисунков показывает, что, как и в модели без учета топологии, в модели с учетом подложки при низких значениях напряжения на эмиттере ($V_E < 1.2$ В) колебания в системе отсутствуют, затем возникают автоколебания периода 1, происходит бифуркация удвоения периода, затем еще ряд удвоений периода и, наконец, возникают хаотические колебания. При дальнейшем увеличении напряжения на эмиттере происходит чередование зон хаотических колебаний с зонами периодических колебаний.

Сравнение рис. 6, б и рис. 9 с рис. 6, а и рис. 7 показывает, что в моделях наблюдается качественное соответствие в динамике развития колебательных режимов системы. Следует также заметить, что при низких напряжениях на эмиттере помимо качественного соответствия наблюдается достаточно хорошее количественное совпадение характера динамических режимов (см. рис. 6, а и б). Однако характерные частоты в модели с учетом подложки смещены вниз примерно на 10% по отношению к частотам модели, не учитывающей влияние подложки (см. рис. 7 и 9).

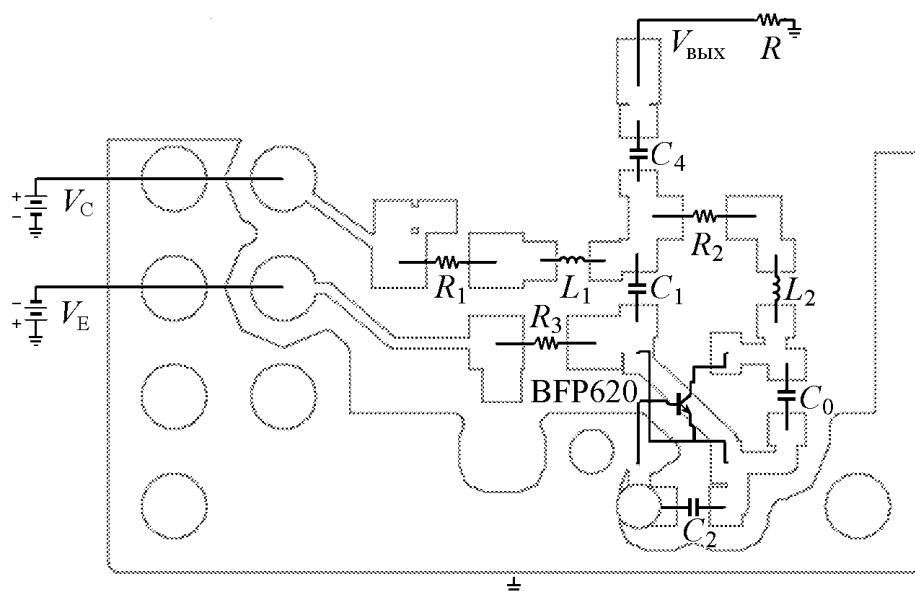


Рис. 8. Топология платы генератора

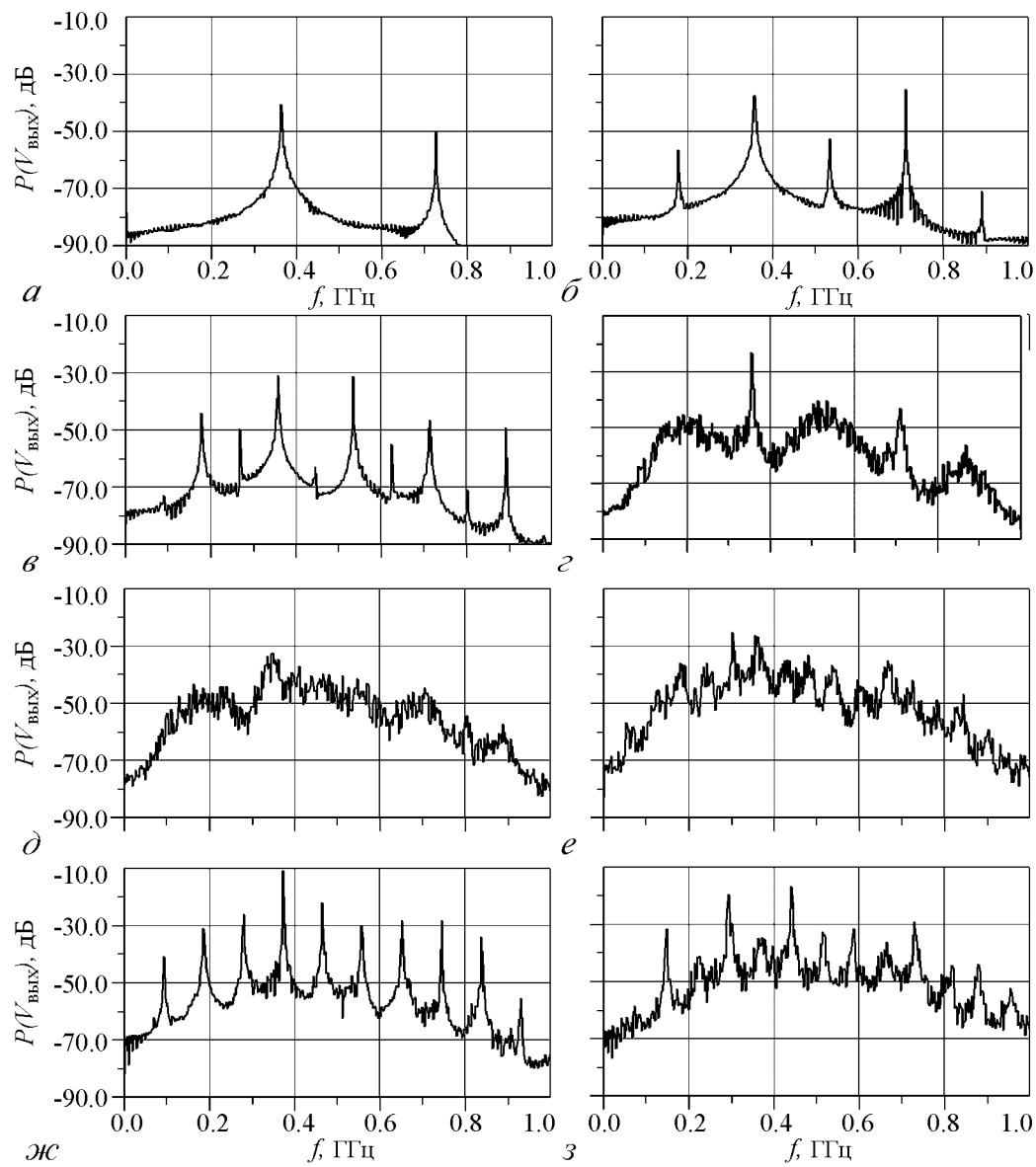


Рис. 9. Спектр мощности на выходе генератора. Моделирование с учетом подложки $V_C = 3$ В; V_E (В):
 а – 1.4, б – 1.7, в – 1.95, г – 2.2, д – 2.4, е – 3.5, ж – 5.0, з – 6.0

4. Экспериментальный макет. Результаты экспериментов

Экспериментальный макет генератора был выполнен на плате длиной 2.5 см и шириной 2 см. В качестве подложки для платы использовался фольгированный материал FR-4, на котором была вытравлена топологическая структура генератора, после чего при помощи поверхностного монтажа были установлены сосредоточенные элементы, определяющие структуру схемы. В качестве активного элемента в макете, как и в модели, использовался транзистор BFP620. Номиналы электронных компонентов генератора совпадают со значениями соответствующих параметров, использованными при моделировании генератора в пакете ADS. Внешний вид экспериментального макета показан на рис. 10.

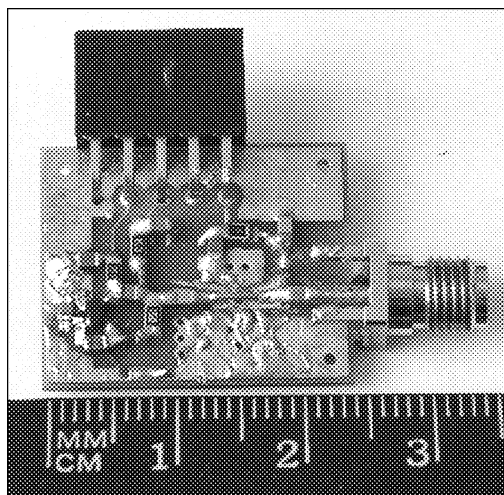


Рис. 10. Экспериментальный макет генератора в диапазоне $100 \div 500$ МГц

Питание генератора осуществлялось от двух источников: первый задавал напряжение коллектор – база транзистора, а второй задавал напряжение эмиттер – база. К переходу коллектор – база прикладывалось напряжение положительной полярности, к переходу эмиттер – база прикладывалось напряжение отрицательной полярности. Значения этих напряжений определяли режим работы генератора (далее в тексте будут указываться абсолютные значения напряжений без учета полярности).

Двухпараметрическая диаграмма режимов, реализуемых в системе при различных значениях напряжений на источниках питания, приведена на рис. 11. Из диа-

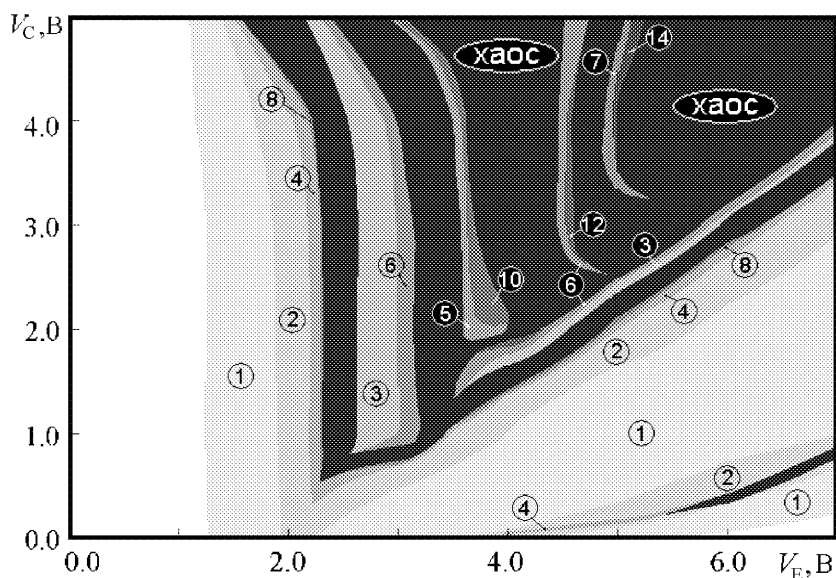


Рис. 11. Двухпараметрическая диаграмма режимов генератора

граммы видно, что в системе существуют широкие зоны хаотических режимов, перемежаемые узкими областями регулярных колебаний различных периодов. Так, при фиксированном напряжении коллектор – база $V_C = 3.0$ В, которое использовалось при моделировании, режим работы генератора зависит от напряжения эмиттер – база V_E следующим образом: при $0 < V_E < 1.3$ В генерация колебаний отсутствует; при $V_E = 1.3$ В возбуждаются гармонические колебания; в диапазоне $1.3 \text{ В} < V_E < 2.3$ В происходит каскад бифуркаций удвоения периода с переходом к хаосу; при $2.3 \text{ В} < V_E < 6.5$ В реализуются хаотические колебания, перемежающиеся окнами периодических колебаний. Эта картина смены динамических режимов в целом согласуется с той, которая наблюдалась при моделировании.

На рис. 12 приведены типичные спектры мощности хаотического сигнала, реализуемого в системе при $V_C = 3.0$ В и различных значениях параметра V_E . Выходная

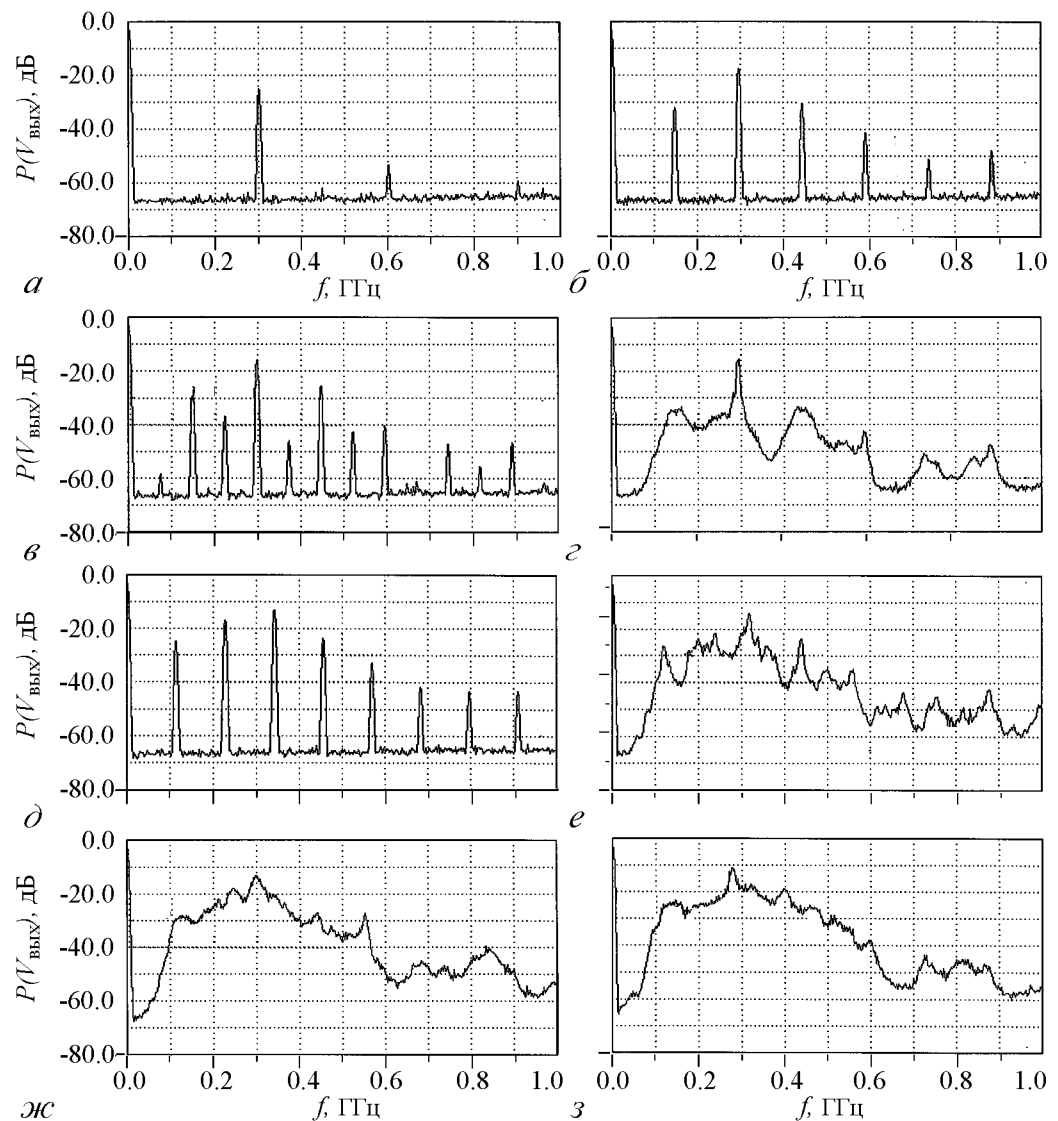


Рис. 12. Спектр мощности на выходе генератора. Эксперимент. $V_C = 3.0$ В; V_E (В): а – 1.4, б – 2.0, в – 2.3, г – 2.5, д – 3.0, е – 3.5, ж – 5.0, з – 6.0

мощность генератора при $V_E = 5.0$ В равна 5 мВт. При этом потребляемая мощность составляет 160 мВт. Таким образом, КПД генератора – около 3%.

Совокупность полученных результатов показывает, что использование пакета ADS для анализа генератора и учет влияния топологии платы и характеристик материала макета позволяет максимально приблизить результаты моделирования к эксперименту.

5. Корреляционная размерность аттракторов

Анализ спектральных характеристик хаоса в эксперименте желательно дополнить восстановлением топологической структуры аттракторов и оценкой их корреляционной размерности. Ниже описываются результаты восстановления структуры фазовых портретов аттракторов в многомерном квазипространстве. На основе восстановленной структуры, производится оценка корреляционной размерности аттракторов системы, в регулярных и хаотических режимах.

Как следует из рис. 12, в экспериментах основная мощность колебаний была локализована в области частот от 100 до 500 МГц. Результаты экспериментов фиксировались в виде спектров мощности на анализаторе спектра типа Hewlett Packard 8596Е и с помощью скоростного осциллографа Tektronix TDS 3052. Осциллограф обладает возможностью производить оцифровку сигнала с точностью 12 бит на отсчет и временем между отсчетами 0.2 нс.

Для восстановления фазового портрета и аттрактора в многомерном фазовом пространстве для каждого из анализируемых режимов оцифровывалась и запоминалась серия данных, состоящая из 10000 отсчетов. Процедура восстановления фазовых портретов по этим сериям заключалась в следующем: на плоскость $(x(t), x(t - \tau))$ наносились пары точек $(x(\Delta t i), x(\Delta t i - \Delta t n))$, которые потом последовательно соединялись между собой, образуя двумерную проекцию фазового портрета, где $\Delta t = 0.2$ нс – время между отсчетами, i – номер отсчета, n – число отсчетов на которое происходило запаздывание. Число n выбиралось так, чтобы время tn составляло примерно 1/4 квазипериода колебаний. В рассматриваемом случае n было выбрано равным 4.

На рис. 13 представлены восстановленные фазовые портреты для двух типов колебаний системы. Первый портрет соответствует режиму колебаний, взятому по-

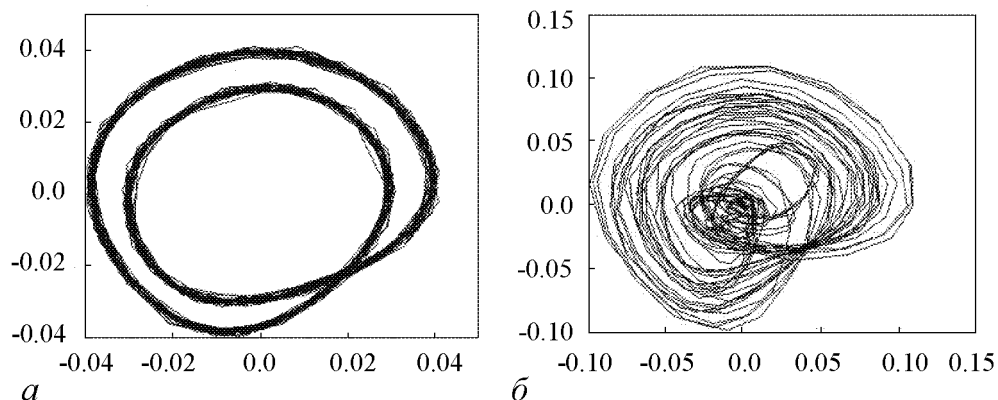


Рис. 13. Фазовые портреты, восстановленные по экспериментальной реализации: *a* – регулярный режим, *б* – хаотический режим

сле бифуркации удвоения (см. спектр сигнала на рис. 12, *б*). Второй фазовый портрет на рис. 13 соответствует непрерывному спектру мощности на рис. 12, *ж* и нерегулярной реализации сигнала, что соответствует хаотическому режиму.

Приведенные данные показывают, что эксперименты с оцифровкой сигнала обеспечили высококачественное восстановление структуры фазовых портретов сигналов радиодиапазона, генерируемых источниками хаоса. Это позволяет сделать вывод о том, что оцифровка сигнала произведена корректно и может быть использована для оценки корреляционной размерности высокочастотного процесса.

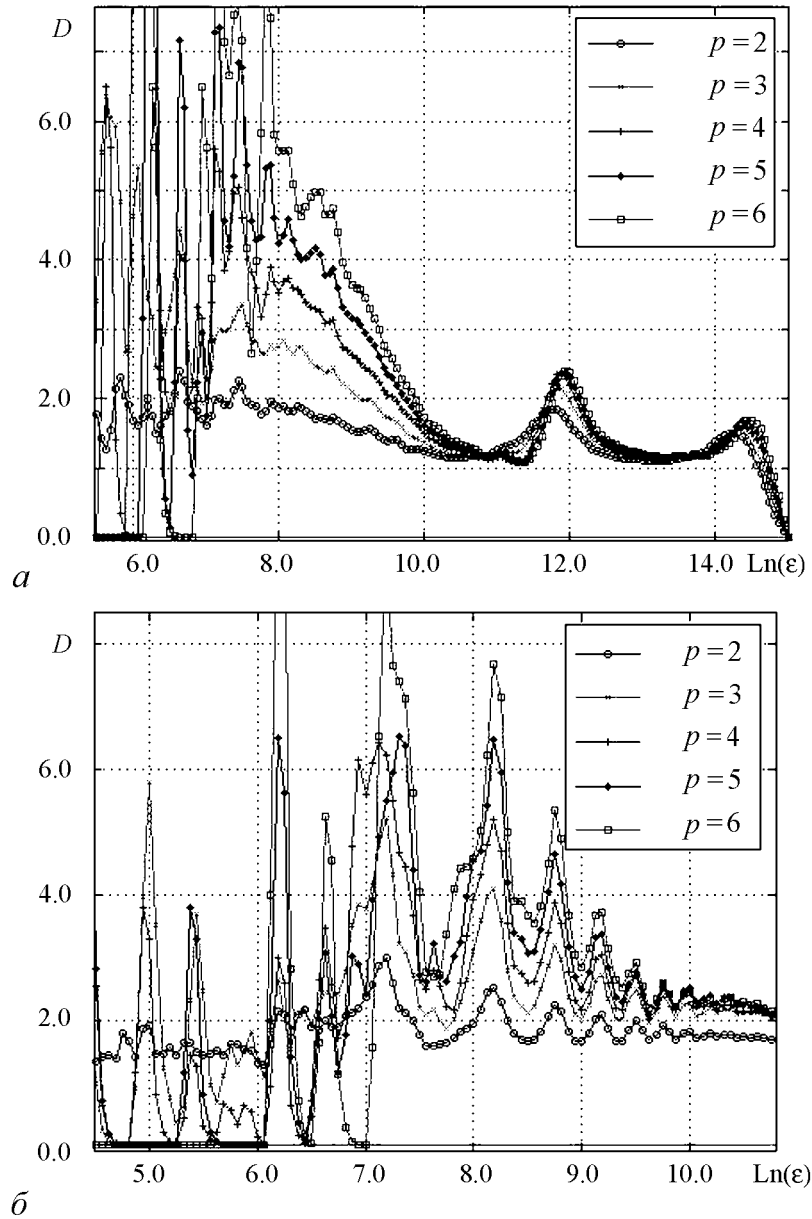


Рис. 14. Корреляционные размерности: *a* – регулярный режим, *б* – хаотический режим

Расчет корреляционной размерности производился путем оценки корреляционного интеграла $\tilde{N}(\varepsilon)$

$$\begin{aligned} \tilde{N}(\varepsilon) &= \{\text{число пар точек } i \neq j \text{ таких, что } \|x_i - x_j\| < \varepsilon\} = \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i,j=1}^M \theta(\varepsilon - \|x_i - x_j\|), \end{aligned} \quad (6)$$

где $x_i = (x_i, x_{i-p}, x_{i-2p}, \dots, x_{i-(m-1)p})$, $i = 1, 2, \dots$, множество точек в m -мерном пространстве (вектора), M – количество отсчетов, ε – заданное расстояние между парой точек, θ – ступенчатая функция Хевисайда, $\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ 1, & x \geq 0. \end{cases}$

В оценке $\tilde{N}(\varepsilon)$ одним из параметров является размерность векторов p . Как правило, заранее не известно, в пространство какой размерности может быть вложен аттрактор. Отсюда возникает проблема правильного выбора размерности вложения p . Если p взято слишком маленьким, то оценка окажется неверной, так как не все компоненты аттрактора будут присутствовать в восстановленном объекте. С другой стороны, если взять p с большим запасом, то аттрактор будет вложен в соответствующее пространство, но при этом слишком велики могут оказаться шумы восстановления. При практической оценке корреляционной размерности поступают следующим образом: рассчитывают семейство корреляционных интегралов в зависимости от ε для серии различных значений p . Далее строят для каждого интеграла графики зависимости, на которых по горизонтальной оси откладывается $\ln \varepsilon$, а по вертикальной $D = \frac{d(\ln N(\varepsilon))}{d(\ln \varepsilon)}$ (рис. 14). Так, на рис. 14, *a* значения p выбраны от 2-х до 6-ти. Значение оценки корреляционной размерности определяется по тому участку этих кривых, где имеет место сходимость к некоторой постоянной величине с увеличением p . На рис. 14, *a* с режимом удвоения периода колебаний такая сходимость происходит к значению $D \sim 1.0$, а на рис. 14, *б* с хаотическим режимом – к значению $D \approx 2.2 \div 2.4$, что согласуется с видом фазового портрета аттрактора на рис. 13, *б*.

Заключение

Предложен генератор хаотических колебаний радиодиапазона. Динамика генератора исследована как для математической модели с кусочно-линейной характеристикой транзистора, так и для схемотехнической модели в пакете ADS, где для описания транзистора использована модель Гуммеля – Пуна, а так же учтено влияние паразитных элементов корпуса транзистора, топологии платы и материала подложки. Реализован экспериментальный макет генератора и проанализированы его режимы. Сопоставление результатов моделирования и эксперимента показало, что использование пакета ADS для моделирования генераторов хаоса радиодиапазона позволяет получить результаты, близкие к экспериментальным данным, что, в свою очередь, облегчает разработку высокочастотных устройств со сложной динамикой.

Совокупность таких свойств, как простота устройства, доступность элементов, составляющих схему, а также их воспроизводимость, устойчивость хаотических

режимов, широкие зоны хаоса в пространстве параметров, реализуемость в радиодиапазоне, а так же высокая энергетическая эффективность генератора позволяет рекомендовать использование этого генератора в качестве источника хаотического сигнала для систем связи с хаотической несущей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 05-02-17667) и аналитической ведомственной целевой программы Минобрнауки «Развитие потенциала высшей школы» на 2006-2007 годы.

Библиографический список

1. *Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н. А., Панас А.И., Старков С.О.* Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио- и СВЧ-диапазонах // Радиотехника. 2000. № 3. С. 9.
2. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новый носитель информации для систем связи. М.: Физматлит. 2002.
3. *Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Panas A.I. and Starkov S.O.* Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2003. Vol. 13, № 6. P. 1495.
4. *Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С.* Передача информации с помощью детерминированного хаоса // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 7. С. 1310.
5. *Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O.* Ring oscillating systems and their application to the synthesis of chaos generators // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 1996. Vol. 6, № 5. P. 851.
6. *Кальянов Э.В., Иванов В.П., Лебедев М.Н.* Экспериментальное исследование транзисторного автогенератора с запаздывающей обратной связью // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27, № 5. С. 982.
7. *Дмитриев А.С., Иванов В.П., Лебедев М.Н.* Модель транзисторного генератора с хаотической динамикой // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33, № 5. С. 1085.
8. *Kennedy M.* Chaos in Colpitts oscillator // IEEE Trans. Circ. System.-1. 1994. Vol. 41, № 11. P. 771.
9. *Feo O., Maggio G., Kennedy M.* The Colpitts oscillator: Families of periodic solutions and their bifurcations // Int. J. of Bifurcation and Chaos. 2000. Vol. 10, № 5. P. 935.
10. *Максимов Н.А., Панас А.И.* Однотранзисторный генератор полосовых хаотических сигналов радиодиапазона // Зарубеж. радиоэлектрон. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 11. С. 61.
11. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.* Транзисторные генераторы хаоса с заданной формой спектра мощности колебаний // Радиотехника. 2005. № 8. С. 67.
12. *Antognetti P. and Massobrio G.* Semiconductor device modeling with SPICE. New-York: McGraw-Hill, Second Edition, 1993.

*Институт радиотехники и электроники РАН Поступила в редакцию 21.07.2006
Московский физико-технический институт*

CHAOTIC RF GENERATOR BASED ON OSCILLATOR WITH 2.5 DEGREES OF FREEDOM

E.V. Efremova, N.V. Atanov, Yu.A. Dmitriev

Chaotic RF generator with bipolar transistor is proposed. Mathematical model of the generator, oscillator with 2.5 degrees of freedom, is investigated. Generator dynamics is analyzed with Advanced Design System (ADS) software using parameters of a real transistor, properties of the board substrate are taken into account by simulation. ADS simulation results are compared with experimental data. It is shown that the use of ADS software for analysis of generator dynamics and account for the board properties and topology allow to get simulation results closer to the experimental one.



Ефремова Елена Валериевна – родилась в 1977 году, окончила Московский физико-технический институт (2000). Кандидат физико-математических наук (2003), научный сотрудник ИРЭ РАН. Область научных интересов – нелинейная динамика, электроника СВЧ, информационные и коммуникационные технологии на основе динамического хаоса. Автор более 30 научных публикаций.



Атанов Николай Васильевич – родился в 1984 году. Студент 6 курса Московского физико-технического института. Имеет 5 научных публикаций. Область научных интересов: динамический хаос, системы передачи и обработки информации.



Дмитриев Юрий Александрович – родился в Москве (1984). Студент 6 курса факультета аэрофизики и космических исследований Московского физико-технического института. Участник студенческих конференций, имеет 2 публикации в сборниках тезисов докладов. Область научных интересов: нелинейная динамика, динамический хаос, океанология.