

01; 09

## АВТОСТОХАСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ИНЖЕКЦИОННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ ТРАНЗИСТОРОВ

Ю.Д. Чайка, А.В. Богун

Изучение странных аттракторов сопровождается интенсивным поиском нелинейных электронных систем, которым свойственна динамическая стохастичность [1]. Детальному исследованию подвергнуты различные виды осцилляторов (автономных и неавтономных), стохастическая динамика которых обусловлена сочетанием классических линейных цепей с нелинейными диодными (инерционными и безынерционными) элементами [1-3]. Менее широко изучены возможности создания автостохастических генераторов (АСГ), хаотичность колебаний которых связана с использованием нелинейных динамических свойств биполярных транзисторов, хотя разнообразие этих свойств представляет широкие возможности [4]. Предметом настоящей работы является транзисторный АСГ, динамика которого определяется инжекционной нелинейностью инерционных и усилительных свойств сплавных (и им эквивалентных) биполярных транзисторов [5].

Согласно схемотехнической классификации рассматриваемый АСГ (рис. 1, а) относится к классу генераторов с включением транзистора по схеме с общим коллектором [6, 7]. Свойства транзистора позволяют считать, что генератор сводится к  $L-C$  осциллятору, дополненному зависимым источником тока  $i_K = f(i_S)$  и омическим сопротивлением базы транзистора  $r_B$  (рис. 1, б). Инерционность транзистора делает осциллятор самовозбуждающимся, а нелинейность инерционных и усилительных свойств определяет возможность хаоса колебаний.

Инжекционные свойства транзисторов, существенные для возникновения хаоса, состоят в нелинейной взаимосвязи их токов с зарядом избыточных носителей в базе  $Q_B$ , а именно: 1) нелинейной связи  $i_K$  и  $Q_B$ , обусловленной изменением времени пролета носителей через базу  $\tau_D(Q_B)$ :

$$i_K = \tau_D^{-1}(Q_B) Q_B, \quad Q_B \geq 0; \quad (1)$$

2) нелинейной связи  $\tau_S$  и  $Q_B$ , вызываемой изменением эффективного времени жизни носителей в базе  $\tau_S(Q_B)$

$$i_S = \tau_S^{-1}(Q_B) Q_B + \frac{dQ_B}{dt}, \quad Q_B \geq 0. \quad (2)$$

Типовой вид зависимостей  $\tau_D, \tau_S$  от  $Q_B$  иллюстрируется графиками рис. 1, в. Изменения  $\tau_D, \tau_S$  с ростом уровня инжекции прояв-

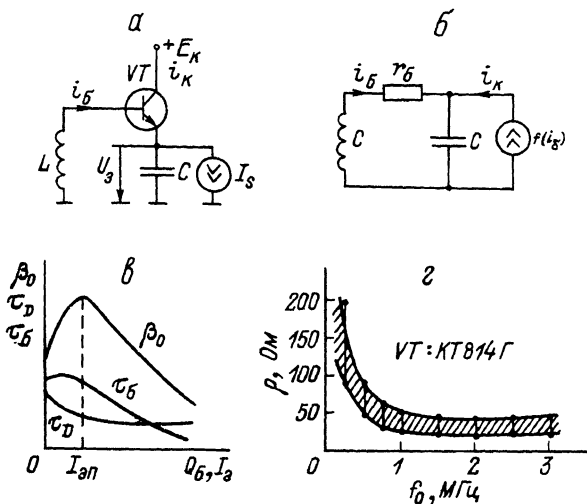


Рис. 1. Принципиальная (а) и упрощенная эквивалентная (б) схемы АСГ; типовые графики инжекционной зависимости параметров транзисторов (в); типовая диаграмма области стохастических колебаний АСГ (г).

плются в изменении коэффициента передачи базового тока  $\beta_0$  от эмиттерного [8].

Исследования рассматриваемого АСГ состояли в изучении посредством натуральных экспериментов бифуркационных явлений в зависимости от следующих факторов: 1) величины тока смещения  $I_S$ , определяющего уровень инжекции носителей в стартовом режиме, предшествующем самовозбуждению АСГ; 2) величины параметра  $\rho = \sqrt{L/C}$ , влияющего на интенсивность возбуждения стартовой колебаний; 3) соотношения стартовой частоты  $f_0$  и граничной частоты транзистора  $f_r$  при различных значениях  $\rho$ . Исследования производились на различных типах отечественных сплавных транзисторов, а также на планарно-эпитаксиальных транзисторах, близких по свойствам к сплавным [8]. Характер колебаний (квазипериодический, сложнопериодический, хаотический) определялся с помощью осциллограмм, спектрограмм и фазовых портретов напряжений и токов в различных цепях АСГ (осциллограф С1-83, спектроанализатор СК4-59).

Результаты исследований сводятся к следующему.

1. Динамическая стохастичность колебаний, свойственная рассматриваемому АСГ, имеет место в режиме большого сигнала, когда, во-первых, интервалы активного режима работы транзистора ( $Q_б > 0, \mu_{кб} > 0$ ) чередуются с интервалами отсечки ( $Q_б = 0, \mu_{кб} < 0$ ), и

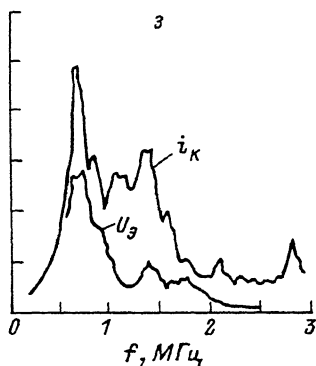
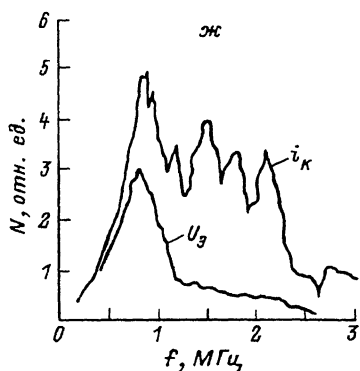
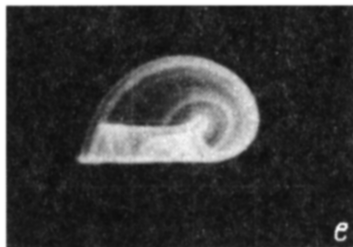
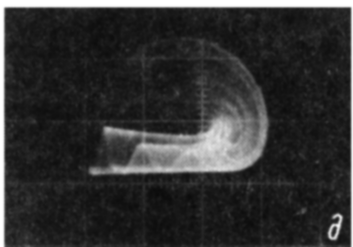
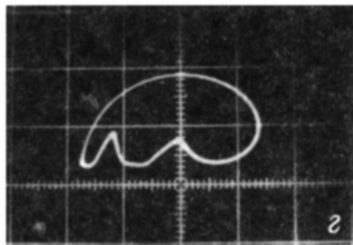
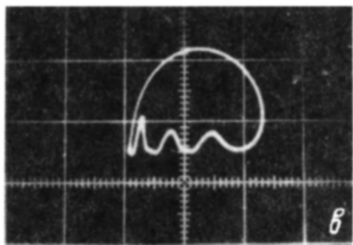
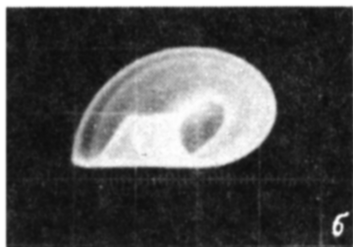
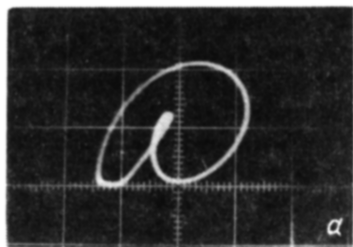


Рис. 2. Фазовые портреты и спектрограммы колебаний АСГ (транзистор КТ814Г,  $f_0 = 1.9$  МГц,  $\rho = 36$  Ом) для случаев удвоения периода (а), хаоса согласно механизму Фейгенбаума (б), субчастотных предельных циклов при  $k_{сч} = 4$  (в),  $k_{сч} = 3$  (г) и хаотического чередования субциклов при максимальной кратности  $k_{сч} = 4$  (д, ж) и  $k_{сч} = 3$  (е, з).

во-вторых, в течение активных интервалов проявляется соответствующая соотношениям (1), (2) инжекционная нелинейность транзисторов. Основными факторами, определяющими характер колебаний, являются: 1) уровень инжекционно-нелинейности транзистора, мерой которой может служить отношение  $I_S / I_{ЭП}$ , где  $I_{ЭП}$  - ток, соответствующий максимуму зависимости  $\beta_0$  от эмиттерного тока (рис. 1, в), 2) величина инкремента роста стартовых колебаний  $\Lambda$ , определяемая параметром  $\rho$ , а также усиительными, инерционными и диссипативными параметрами транзистора.

2. Значения инкремента роста  $\Lambda$ , при которых имеют место хаотические явления, зависят от особенностей нелинейных инжекционных свойств транзисторов, связанных с электрофизическими и технологическими факторами. Установлено, что при применении транзисторов различных типов в широком диапазоне значений  $f_0/f_c$  динамический хаос имеет место при  $\Lambda = (3 \dots 6)$ . Область значений  $\rho$ , при которых наблюдается стохастичность, в функции  $f_0$  иллюстрируется диаграммой рис. 1, г.

3. Изменение  $I_S$  при рациональном выборе  $f_0$  и  $\rho$  приводит к следующим бифуркациям колебаний: 1) квазигармонические колебания при  $I_S / I_{ЭП} \sim (0.02 \dots 0.1)$ ; 2) последовательность бифуркаций удвоения периода, завершающаяся стохастическими колебаниями, согласно механизму Фейгенбаума при  $I_S / I_{ЭП} (0.1 \dots 0.2)$ ; 3) бифуркации образования и разрушения субчастотных предельных циклов и стохастические колебания их хаотического чередования при  $0.2 < I_S / I_{ЭП} < 3$  (виды колебаний иллюстрируются фазовыми портретами в системе координат  $U_3, I_c$ , представленными на рис. 2, а-е). Бифуркации и хаос последней разновидности являются специфической особенностью рассматриваемой системы по сравнению с известными [1-4].

4. Субчастотные колебания, существующие в узких интервалах значений  $I_S / I_{ЭП}$  ("островки устойчивости" шириной порядка  $0.01 I_S / I_{ЭП}$ ), состоят в том, что напряжения и токи в АСГ меняются сложнопериодически, с частотой, в несколько раз меньшей стартовой  $f_0$ , причем одному периоду изменения всех электрических величин соответствует несколько активных этапов работы транзисторов. Кратность субциклов  $k_{сц}$  (число активных этапов, приходящихся на период) по мере увеличения  $I_S / I_{ЭП}$  меняется немонотонно: начальное и конечное значения  $k_{сц}$  равны 2; максимальные наблюдавшиеся значения достигали 4 ... 5. Возникновение субчастотных явлений при  $I_S / I_{ЭП} < 1$  связано с уменьшением  $\tau_D(Q_5)$ , а их исчезновение при  $I_S / I_{ЭП} > 1$  - с уменьшением  $\tau_5(Q_5)$ .

5. Стохастические колебания при значениях  $I_S / I_{ЭП}$ , разделяющих "островки устойчивости", состоят в самопроизвольном чередовании субциклов различной кратности, которое по аналогии с "блужданием" по резонансам нелинейных осцилляторов [9] можно рассматривать как "блуждание" по субциклам. Специфика колебаний рассматриваемого АСГ состоит в том, что "блуждание" является быстрым: циклы колебаний одной кратности являются, преимущественно, разовыми. Вследствие этого энергетический спектр колебаний пока-

лизуется в диапазоне частот около 1 ... 2 октав и обладает достаточно высокой равномерностью (рис. 2, ж, з). Коллекторный ток транзистора представляет собой хаотическую последовательность импульсов с различной амплитудой, длительностью и интервалами следования. Его спектр более широкополосен, чем спектр эмиттерного напряжения.

В заключение следует отметить, что обобщение динамических свойств рассматриваемого АСГ приводит к выявлению семейства автостохастических систем с качественно новыми и ранее неизвестными характеристиками.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Хаотические системы // ТИИЭР. 1988. Т. 75. № 8.
- [2] Пиковский А.С., Рабинович М.И. // ДАН СССР. 1978. Т. 239. № 2. С. 301-304.
- [3] Анищенко В.С., Астахов В.В., Летчфорд Т.Е. // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. № 10. С. 1972-1978.
- [4] Дмитриев А.С., Иванов В.П., Лебедев М.Н. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. № 5. С. 1085-1088.
- [5] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984, кн. 1. 456 с.
- [6] J i b b o n s J.E. // Proc. IRE. 1961. V. 49. N 9. P. 1383-1390.
- [7] T o u s s a i n t H.N. // Frequenz. 1967. B. 21. N 6. P. 193-200.
- [8] Полупроводниковые приборы: транзисторы. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985. 909 с.
- [9] Заславский Г.М., Чириков Б.В. // УФН. 1971. Т. 105. № 1. С. 3-39.

Киевский государственный  
университет им. Т.Г. Шевченко

Поступило в Редакцию  
21 апреля 1989 г.