

как некоторый эквивалентный генератор, так как и форма спектров генераторов, и характер эволюции те же, что и для более простой системы с аналогичными связями. Для примера на рис. 3 приведен график зависимости частот основных колебаний генераторов системы от величины резистивной связи  $\gamma$ .

Основные выводы данной работы.

1. Многочастотные спектры автоколебаний системы взаимодействующих генераторов определяются типами и величинами связей между генераторами.

2. Управление спектром генерирующей системы возможно путем изменения величины и типа связи.

3. Эволюция многочастотных спектров генерирующей системы при изменении связей и расстроек парциальных частот генераторов определяется эволюцией резонансной характеристики линейной части системы.

4. Группа генераторов, работающих в синхронном режиме (кластер), может быть заменена одним эквивалентным генератором. При наличии кластеров порядок эквивалентной системы понижается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ланда П. С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М.: Наука, 1980. [2] Демьянченко А. Г. Синхронизация генераторов гармонических колебаний. М.: Энергия, 1976. [3] Грачева И. Ю., Минина Г. П., Минакова И. И. Деп. ВИНТИ № 1920-81. [4] Storti D. W., Rand R. H. J. Non-linear Mech., 1982, 17, № 3, p. 143. [5] Романовский Ю. М. Изв. вузов. Радиофизика, 1972, 15, с. 718. [6] Дудник Е. Н., Кузнецов Ю. И., Минакова И. И. Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1984, 27, № 7, с. 37.

Поступила в редакцию  
05.04.85

После переработки —  
31.05.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1985, Т. 26, № 6

УДК 621.377.12:621.391.822

## ДЕЙСТВИЕ ШУМОВ НА ГРАНИЦЫ ПЕРЕХОДОВ «ХАОС—ПОРЯДОК» В АВТОГЕНЕРАТОРЕ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

О. И. Кораблев, Ю. И. Кузнецов, В. В. Потемкин, А. В. Степанов

(кафедра физики колебаний)

Исследованию динамических систем с хаосом посвящено много работ (см., например, обзор [1]). Однако принципиальный вопрос о роли естественных флуктуаций при возникновении хаоса и их влиянии на статистические свойства хаоса к настоящему времени изучен недостаточно полно.

Первоначально исследователи придерживались мнения о слабом влиянии шумов на статистические характеристики хаотических автоколебаний [2–5]. Сравнительно недавно было установлено, что в ряде случаев шумы существенно влияют на поведение систем с хаосом. Так, в работах [6, 7] показано, что в генераторе, описанном в работе [8], под действием шумов меняются статистические характеристики хаотических автоколебаний, и с ростом интенсивности шума наблюдались случаи перехода из периодического режима в режим хаоса. В работе [9] методами вычислительного эксперимента обнаружено расширение областей хаоса при увеличении уровня шумов. В работе [10] показано, что шумы сокращают время памяти системы.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния шумов на границы переходов «хаос — порядок» в динамических системах с хаосом.

В качестве объекта исследования был использован простой автогенератор хаотических колебаний, эквивалентная схема которого приведена на рис. 1, а. Принципы работы этой схемы соответствуют описанным в работах [8, 11]. Схема содержит параллельный колебательный LC-контур с активным элементом ( $-g$ ) и ключом  $K$ , управляющим потерями в контуре. В начальный момент ключ разомкнут и происходит экспоненциальное нарастание амплитуды колебаний в контуре. При достижении напряжения  $U$  на контуре заданного уровня  $U_2$  верхнего порога срабатывания ключ замыкается, нагружая контур на малое активное сопротивление  $r$  ( $|rg| \ll 1$ ). Происходит сброс накопленной энергии, напряжение  $U$  уменьшается, и при достижении заданного уровня нижнего порога  $U_1$  ключ размыкается. Начинается развитие нового

пуга колебаний. Математической моделью указанной схемы является система двух линейных дифференциальных уравнений второго порядка с условиями перехода от одного уравнения к другому:

$$\begin{cases} \ddot{U} - (g/C)\dot{U} + \omega_0^2 U = 0 & U \geq U_2 \\ \ddot{U} + (1/C)(1/r - g)\dot{U} + \omega_0^2 U = 0 & U < U_1 \end{cases}$$

Здесь  $\omega_0^2 = 1/(LC)$ . Упрощенная схема реального генератора показана на рис. 1, б. Она содержит LC-генератор, выполненный на операционном усилителе ОУ, электронный ключ на полевом транзисторе ПТ и логическую схему ЛС, реализующую описанный выше алгоритм переключений ключа. Динамический диапазон генератора дос-

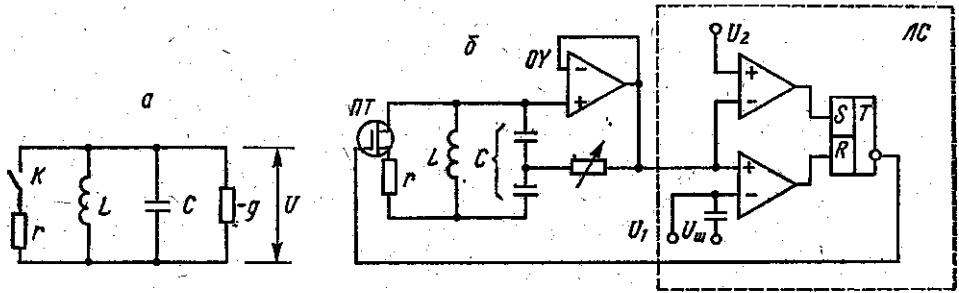


Рис. 1. Генератор хаотических колебаний: а — эквивалентная схема, б — упрощенная принципиальная схема; ПТ — полевой транзистор КП304, ОУ — операционный усилитель К544УД2, в логической схеме применены компараторы К554СА3 и триггер К155ТМ2. Резонансная частота контура 70 кГц

тигал 80 дБ, уровень импульсных помех на 30 дБ меньше уровня нижнего порога  $U_1$ , время переключения логической схемы не превышало 0,5% периода собственных колебаний в контуре,  $T = 2\pi/\omega_0$ . Указанные параметры свидетельствуют о том, что это устройство с хорошей точностью имитирует работу идеализированного генератора.

В зависимости от величины напряжения верхнего порога  $U_2$  (при фиксированных остальных параметрах) система генерирует либо периодическую последовательность цугов нарастающих колебаний, либо хаотические колебания. В первом случае спектр движений системы имеет дискретный характер, во втором случае спектр является сплошным. Для регистрации сложных периодических режимов и режима хаоса использовалась схема, основанная на преобразовании длительности цугов в напряжение, и спектр мощности колебаний генератора регистрировался в узкой полосе частот  $\Delta\omega$  на частоте  $\omega_1$  вблизи частоты  $\omega_0$ . В эксперименте было  $(\omega_1 - \omega_0)/\omega_0 < 1\%$  и  $\Delta\omega/\omega_0 < 0,2\%$ . На рис. 2, а представлена зависимость указанного спектра мощности  $S$  от параметра  $U_2$ . Здесь области с нулевой спектральной интенсивностью соответствуют периодичес-

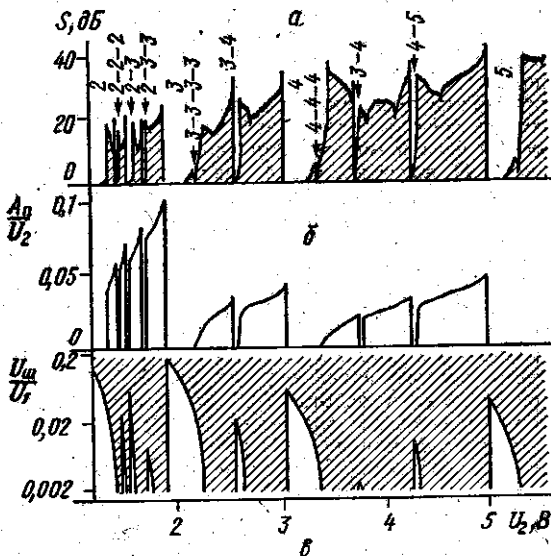


Рис. 2. а — Области хаоса и периодических режимов. б — Порог синхронизации хаоса гармоническим сигналом. в — Влияние внешнего шума на границы переходов «хаос—порядок»

ким режимам. Для обозначения этих режимов применен цифровой код, выражающий число колебаний в каждом периоде периодической последовательности. В областях хаоса  $S > 0$ . Установлено, что левые и правые границы каждой области хаоса имеют различный характер. При вхождении в область хаоса слева при увеличении  $U_2$  переход от порядка к хаосу происходит «мягко» через последовательность бифуркаций удвоения периода. В эксперименте наблюдалось до четырех бифуркаций. Для переходов к хаосу через правые границы характерно «жесткое» возникновение развитого хаоса. Для исследования зависимости «глубины» хаоса от  $U_2$  и характера границ перехода «порядок — хаос» использовались результаты работы [12], в которой показано, что амплитудный порог внешней синхронизации может служить мерой хаоса. На рис. 2, б показан нормированный на величину  $U_2$  амплитудный порог  $A_n$  при синхронизации системы внешним гармоническим сигналом на частоте  $\omega_0$ .

Изучение влияния внешних шумов на границы переходов «хаос — порядок» проводилось при подаче широкополосного бинарного шума  $U_{ш}$  на нижний порог  $U_1$ . На рис. 2, в показана зависимость границ переходов от амплитуды внешнего шума, нормированной на величину  $U_1$ . Области хаоса здесь обозначены штриховкой. Прежде всего следует отметить, что наиболее сильно внешний шум воздействует на узкие области, соответствующие сложным периодическим режимам. Уже при относительной амплитуде шума  $5 \cdot 10^{-3}$  многие сложные периодические режимы не наблюдаются. Увеличение уровня шума приводит к тому, что сужаются и исчезают и другие достаточно широкие области устойчивости.

Примечательным является факт различного действия шумов на границы переходов «хаос — порядок», имеющие «мягкий» и «жесткий» характер. Расширение областей хаоса при увеличении амплитуды внешнего шума в исследованной системе происходило только со стороны грани, соответствующих мягкому возникновению хаоса. В эксперименте практически не было заметно влияния шумов на границы переходов, характеризующих жестким возникновением хаоса.

Таким образом, результаты эксперимента указывают на существенное влияние шумов на границы переходов «хаос — порядок» с мягким возникновением хаоса через последовательность бифуркаций удвоения периода и малое влияние шумов на границы переходов с жестким переходом к хаосу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рабинович М. И. УФН, 1978, 125, № 1, с. 123. [2] Кифер Ю. И. Изв. АН СССР. Матем., 1974, 38, № 5, с. 1091. [3] Nakamura K. Progr. Theor. Phys., 1978, 59, N 1, p. 64. [4] Crutchfield J. P., Huberman B. A. Phys. Lett., 1980, A77, N 6, p. 407. [5] Shraiman B., Wayne C. E., Martin P. C. Phys. Rev. Lett., 1981, 46, p. 935. [6] Апресян Л. А., Кравцов Ю. А., Рабинович М. И. Радиотехн. и электроника, 1984, 29, с. 473. [7] Кравцов Ю. А., Полянина Г. Д., Эткин В. С. Там же, 1984, 29, с. 479. [8] Княшко С. В., Пиковский А. С., Рабинович М. И. Там же, 1980, 25, с. 336. [9] Анищенко В. С., Астахов В. В., Летчфорд Т. Е., Сафонова М. А. Изв. вузов. Радиофизика, 1983, 26, с. 832. [10] Кравцов Ю. А., Эткин В. С. Изв. вузов. Радиофизика, 1981, 24, с. 992. [11] Неймарк Ю. И. В кн.: Качественные методы теории нелинейных колебаний. Киев: Наукова думка, 1984, с. 288. [12] Кузнецов Ю. И., Ланда П. С., Ольховой А. Ф., Перминов С. М. ДАН СССР, 1985, 281, № 2, с. 291.

Поступила в редакцию  
08.04.85