

01; 09

© 1990

УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ МОЩНОСТИ
ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА
С НИЗКОЙ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ

А.С. Д м и т р и е в, С.О. С т а р к о в,
Ю.Л. Б е л ь с к и й

Исследования маломерных систем с хаотическими колебаниями породили надежду на возможность создания источников сигналов с заданной структурой спектра мощности. Она основана на том, что уже колебания, отвечающие типовым странным аттракторам (СА), возникающим в результате разрушения одночастотных колебаний (аттракторы Лоренца, Смейла, Шильникова [1-3]) и двухчастотных колебаний (торовый хаос [4-5]) обладают в совокупности широкой гаммой спектров мощности (см., напр., [6-7]).

Поэтому правомерна постановка задачи о синтезе хаотических колебаний с заданными спектральными характеристиками. В данном сообщении эта задача изучается применительно к получению спектра мощности с огибающей, равномерной в полосе частот от $f_{\text{МИН}}$ до $f_{\text{МАКС}}$.

В качестве объекта исследования используется модель автоколебательной системы, состоящая из замкнутых в кольцо нелинейного элемента (НЭ), линейного усилителя (ЛУ), фильтра нижних частот первого порядка, фильтра нижних частот второго порядка и полосового фильтра второго порядка. Система уравнений, описывающая модель, имеет вид

$$T\dot{X} + X = F(Z, M), \quad \ddot{Y} + \alpha_1 \dot{Y} + \omega_1^2 Y = \omega_1^2 X, \quad \ddot{Z} + \alpha_2 \dot{Z} + \omega_2^2 Z = \omega_2^2 Y, \quad (1)$$

где $F(Z, M) = MZ \exp(-Z^2)$ - характеристика нелинейного элемента; α_1, α_2 - коэффициенты диссипации фильтров второго порядка; ω_1, ω_2 - резонансные частоты фильтров второго порядка, T - постоянная времени RC-фильтра.

Система уравнений (1) имеет единственное положение равновесия в начале координат. M - коэффициент усиления ЛУ - играет роль параметра надкритичности. В области положительных значений M с ростом надкритичности положение равновесия теряет устойчивость и возникает предельный цикл, отмечающий автоколебаниям с частотой $f_1 = \omega_1 / (2\pi)$, а при $M < 0$ с ростом M возникают автоколебания с частотой $f_2 = \omega_2 / (2\pi)$. С дальнейшим увеличением надкритичности как в случае $M > 0$, так и в случае $M < 0$ возбуждается вторая частота (в фазовом пространстве рождается двумерный тор), приблизительно равная f_2 и f_1 соответственно.

Покажем, что хаотические колебания, возникающие в системе при разрушении двухчастотных колебаний, могут иметь достаточно

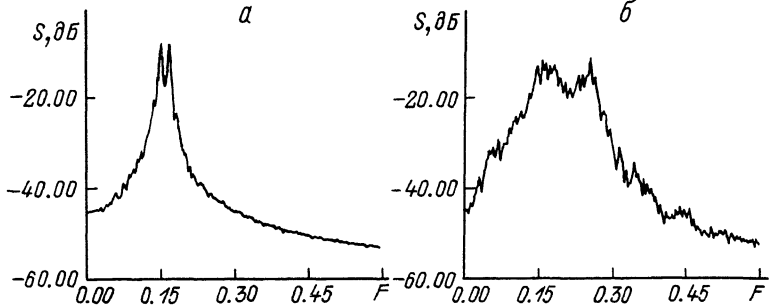


Рис. 1. Спектры мощности колебаний: а – узкополосный случай ($\omega_1=1$; $\omega_2=1$; $\alpha_1=0.1$, $\alpha_2=0.1$, $T=2.0$, $M=7.5$); б – с полосой порядка октавы ($\omega_1=1.0$; $\omega_2=1.55$; $\alpha_1=0.3$; $\alpha_2=0.2$; $T=1.0$; $M=32$).

произвольную заданную форму спектра, а именно: а) узкополосный спектр с унимодальной огибающей; б) полосовой относительно равномерный спектр средней ширины (до октавы); в) полосовой широкополосный спектр (более октавы); г) спектр мощности с бимодальной огибающей.

Рассмотрим сначала случай формирования узких спектров ($2x \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \ll 1$). Для формирования таких спектров резонансные частоты ω_1 и ω_2 выбираются близкими друг к другу либо равными, так чтобы разность $f_{\max} - f_{\min}$ соответствовала заданной полосе спектра хаотического сигнала, а параметры α_1 , α_2 , T имеют значения, формирующие достаточно равномерную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в пределах полосы пропускания. На частотах, кратных f_1 и f_2 , АЧХ должна иметь при этом достаточно малый коэффициент пропускания. Пример такого спектра с относительной полосой ~ 0.2 приведен на рис. 1а. Кроме возможности формирования узкополосных спектров такой подход дает возможность формирования спектров средней ширины до $f_{\max} / f_{\min} < 2$, т.е. с полосой до октавы (рис. 1б).

Дальнейшее увеличение относительной полосы хаотических колебаний может быть достигнуто за счет такого выбора значений параметров, при котором в полосу прозрачности системы попадают не только основные частоты, но и их гармоники. Рассмотрим возникающие при формировании широкополосных спектров вопросы на примере формирования спектра с полосой $f_{\max} / f_{\min} < 3$.

Вариацией параметров обеспечивается ширина полосы пропускания линейной части системы при неравномерности 8 дБ (рис. 2, а). Затем при выбранных значениях параметров производится поиск области значений коэффициента усиления, в которой реализуются хаотические колебания и достигается малая неравномерность спектра мощности в полосе. Здесь нужно иметь в виду следующее обстоятельство. Если взять отношение резонансных частот очень близким

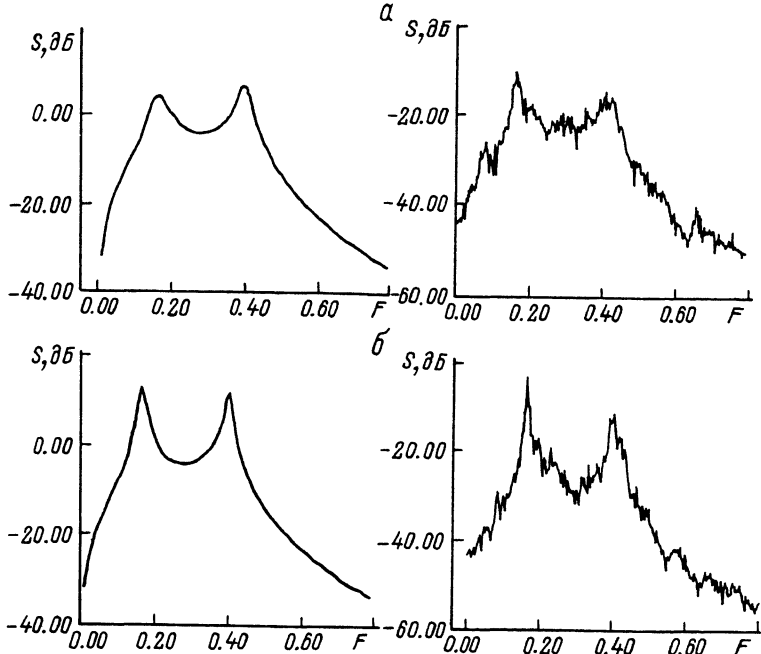


Рис. 2. АЧХ линейной части системы (слева) и спектры мощности колебаний (справа): а - АЧХ, близкая к равномерной в полосе частот ($\omega_1=1.0$, $\omega_2=2.5$, $\alpha_1=0.3$, $\alpha_2=0.2$, $T=0.2$, $M=32$); б - АЧХ с ярко выраженной бимодальностью ($\omega_1=1.0$, $\omega_2=2.5$, $\alpha_1=0.1$, $\alpha_2=0.1$, $T=0.2$, $M=32$).

к трем, то при росте параметра надкритичности возникает сильный резонанс с числом вращения Пуанкаре $\rho=1/3$. С ростом надкритичности он разрушается и возникает хаотический режим. Однако неравномерность спектра мощности этого режима велика и достигает в требуемой полосе 35 дБ. Она может быть несколько снижена за счет дальнейшего увеличения параметра надкритичности, но более эффективным оказывается небольшое изменение соотношения резонансных частот RLC -фильтров. В этом случае с ростом M после потери устойчивости предельного цикла и возбуждения второй частоты возникает не сильный, а слабый резонанс. После разрушения этого резонанса и перехода к хаосу возникает режим с меньшей неравномерностью спектра мощности. Так при одних и тех же значениях параметра надкритичности и других параметров системы изменение отношения резонансных частот с 3.0 до 2.5 привело к уменьшению неравномерности спектра мощности в полосе прозрачности до 10 дБ (рис. 2, а).

Выше показана возможность варьирования в широких пределах полосы спектра хаотических колебаний. Основой этого служило

изменение полосы пропускания линейной части системы. С динамической же точки зрения регулирование спектра осуществлялось за счет использования СА, возникающих при разрушении резонансов различных порядков. Для того чтобы завершить доказательство факта возможности синтеза спектра хаотических сигналов с заданной огибающей спектра мощности и, более того, подтвердить, что спектр мощности в значительной степени отслеживает форму АЧХ линейной части системы, рассмотрим как меняется спектр мощности в режиме хаотических колебаний при разрушении одного и того же резонанса при разной форме АЧХ.

Соответствующие результаты иллюстрируются рис. 2. Здесь представлены спектры мощности колебаний при разрушении резонанса 2:5 в случаях малого и большого перепада АЧХ в пределах полосы пропускания. В случае, представленном на рис. 2, б, АЧХ носит ярко выраженный бимодальный характер. Возникающий при разрушении резонанса хаотический режим, в отличие от случая, представленного на рис. 2, а, также имеет спектр мощности с ярко выраженным бимодальным характером, который в значительной степени "отслеживает" форму АЧХ.

Таким образом, показано, что в автоколебательных конечномерных системах постоянной структуры за счет изменения параметров можно эффективно управлять шириной спектра мощности хаотических колебаний и формой огибающей спектра. Простой алгоритм реализации формы огибающей спектра, близкой к заданной, основан на том, что спектр мощности хаотического сигнала в определенной степени воспроизводит АЧХ линейной части системы.

Полученные результаты, относящиеся к реализации спектра мощности в заданной полосе частот, являются справедливыми не только для рассматриваемой модели, но и для широкого класса автоколебательных систем с двухчастотной динамикой. Однако алгоритмы нахождения значений параметров, при которых реализуются требуемые режимы, будут определяться структурами этих автоколебательных систем и могут быть более сложными, чем в рассмотренном случае.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] L o r e n z E.N. // J. Atmos. Sci. 1963. V. 20. №1. P. 130.
- [2] F e i g e n b a u m M. // J. Stat. Phys. 1978. V. 19. N 1. P. 25.
- [3] Ш и л ь н и к о в П.П. Теория бифуркаций и турбулентность // Проблемы нелинейных и турбулентных процессов в физике. Ч. 2. 1985 г. С. 118-124.
- [4] A r o n s o n D.S., C h o r y M.A., H a l l G.R., M c G e h e y R.P. // Comm. Math. Phys. 1982. V. 83. N 3. P. 303.
- [5] А ф р а й м о в и ч В.С., Ш и л ь н и к о в П.П. В сб.: Методы качественной теории дифференциальных уравнений. Горький: ГГУ, 1983. С. 113.

[6] А н и щ е н к о В.С. Стохастические колебания в радиофизических системах. Саратов: СГУ, ч. 1. 1986.

[7] Д м и т р и е в А.С., К и с л о в В.Я. Стохастические колебания в радиофизике и электронике. М.: Наука, 1989.

Институт радиотехники
и электроники АН СССР,
Москва

Поступило в Редакцию
22 декабря 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 9

12 мая 1990 г.

02; 04; 12

© 1990

ПОЛУЧЕНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГЕНЕРАТОРЕ ГИТ-4

Р.Б. Б а к ш т, С.П. Б у г а е в, А.М. В о л к о в,
И.М. Д а ц к о, А.А. К и м, Б.М. К о в а л ь ч у к,
В.А. К о к ш е н е в, А.В. Л у ч и н с к и й,
Г.А. М е с я ц, А.Г. Р у с с к и х, А.В. Ф е д ю н и н

В настоящее время в качестве мощного источника мягкого рентгеновского излучения широко используется плотная высокотемпературная плазма, получаемая при сжатии лайнера. Как правило, в лайнерных схемах получения МРИ в качестве источника тока применяются генераторы тераваттного диапазона на водяных линиях [1]. В данной работе описаны эксперименты, в которых источником энергии для сжатия многопроволочного лайнера из медных и вольфрамовых микропроводников служит генератор с индуктивным накопителем ГИТ-4 [2].

Генератор ГИТ-4 (рис. 1, а) представляет собой многомодульный импульсный генератор тераваттной мощности с плазменным размыкателем, работающий по схеме Маркса. Работы проводились на уровне энергии 25 и 50 % от полного энергозапаса ГИТ-4 (2.4 мДж), при этом амплитуда тока в индуктивном накопителе (220 нГн) и генератора достигла 1.8 и 2.4 МА соответственно. Для переключения тока на лайнер использовался плазменный прерыватель, позволяющий иметь на нагрузке ток 1.0–1.6 МА при $aI/dt = (1.5 - 2.0 \cdot 10^{13} \text{ А/с})$ соответственно (рис. 1, б). Полная начальная индуктивность вторичного контура с лайнером составляла 70 нГн. В экспериментах измерялось напряжение на прерывателе ($U + L_1 \times dI/dt$), ток в индуктивном накопителе (I_1) и ток в нагрузке (I_2). Для регистрации излучения использовались вакуумные рентгеновские диоды с алюминиевым и золотым катодом, калориметр и камеры-обскуры.