### УДК 621.517.373

# ПОСТРОЕНИЕ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ МОДЕЛИ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ СЕКЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Д. А. Грибков, В. В. Грибкова, Ю. А. Кравцов, Ю. И. Кузнецов, А. Г. Ржанов, А. С. Чепурнов (кафедра физики колебаний)

По экспериментальным временным реализациям процесса в системах стабилизации резонансной частоты и температуры секции линейного ускорителя электронов (разрезного микротрона непрерывного действия НИИЯФ МГУ) построены дифференциальные уравнения, дающие топологически изоморфные реальной системе фазовые портреты. Сделано предположение о наличии хаотической динамики в указанных системах и предложены варианты ее подавления.

Создание достаточно простых математических моделей в виде дифференциальных уравнений, адекватно описывающих динамику процессов в сложных системах, является весьма актуальной и трудной задачей. В многокомпонентных системах часто бывает нелегко выделить наиболее существенные факторы, определяющие их динамическое поведение, и получить простую модель системы на основе экспериментальных данных. Успехи последних лет в области нелинейной динамики в ряде случаев позволяют решить указанную проблему (см., напр., [1]). Речь идет о решении обратной задачи нелинейной динамики с использованием временной реализации одной из значимых переменных процесса.

Цель настоящей работы — создать по одной реализации процесса простую математическую модель, описывающую системы стабилизации резонансной частоты (ССРЧ) и температуры (ССТ) секции разрезного микротрона непрерывного действия НИИЯФ МГУ.

Секция ускорителя представляет собой набор последовательно связанных резонаторов СВЧ, в которые от усиливающего клистрона поступает опорный сигнал (2450 МГц) мощностью около 16 КВт. Для стабилизации резонансной частоты (РЧ) и температуры секции используется схема с отрицательной обратной связью по температуре (рис. 1). В процессе работы ускорителя всегда включена только одна из-



Рис. 1. Блок-схема стабилизации резонансной частоты и температуры ускоряющей секции разрезного микротрона непрерывного действия НИИЯФ МГУ

указанных систем. РЧ и температура стабилизируются путем нагревания или охлаждения секции, которая сделана из меди и пронизана каналами с циркулирую-щей подогреваемой водой. В ССРЧ сигнал ошибки снимается с фазового детектора (ФД), регистрирующего разбалансировку фаз входного и выходного сигналов резонатора, зависящую от ухода РЧ секции, а в ССТ — с термодатчика, контактирующего с секцией. ФД сделан на основе двойного балансного смесителя и имеет сину-соидальную характеристику. Обе системы имеют общий линейный блок электронной обработки сигнала ошибки и управляющий блок, состоящий из нагревателей и системы циркуляции воды с суммарным временем запаздывания около 3 с. Более детально структура ускорителя представлена в работе [2].

Для анализа обенх систем использовались временные зависимости напряжения на выходе  $\Phi Д U(t_i)$  при времени дискретизации 1 с (по 1024 точки в каждой реализации). Характер процесса при вклю-

ченной ССРЧ показан на рис. 2, а. К временному ряду  $U(l_i)$  была применена численная процедура восстановления системы дифференциальных уравнений по одной временной реализации наблюдаемого процесса. Процедура содержит следующие основные этапы.

1. Фильтрация шумов на основе метода, описанного в [3]. На рис. 2, 6 показана реализация после фильтрации X (t<sub>i</sub>).

96





2. Определение размерности  $N_d$  аппроксимирующего фазового пространства [4]. Эта величина показывает количество значимых независимых переменных, необходимых для описания процесса. В данном случае получено  $N_d$ =3.

3. Выявление скрытых переменных системы. Временные реализации восстановленных скрытых переменных изображены на рис. 2, в и г.

4. Построение фазовых траекторий для отфильтрованных данных (рис. 3, а). В фазовом пространстве системы существует странный аттрактор типа двойной спирали.

5. Решение обратной задачи восстановления динамической системы по выявленным скрытым переменным в классе обыкновенных дифференциальных уравнений с полиномиальными нелинейностями. В результате была получена система дифференциальных уравнений:

$$\dot{X} = Y,$$
$$\dot{Y} = Z.$$

$$\dot{Z} = \frac{1}{X} (C_1 X + C_2 Y + C_3 X^2 + C_4 X Y + C_5 X^3 +$$

$$+ C_8 X^3 Y + C_7 X^3 Z + C_8 X Y^2 + C_9 X^4 + C_{10} X^3 Y$$

где безразмерные коэффициенты принимают значения  $C_1 = -182,8$ ,  $C_2 = 2,5$ ,  $C_3 = -86,4$ ,  $C_4 = -$ , 0,  $C_5 = 681,2$ ,  $C_6 = -35,7$ ,  $C_7 = 3,3$ ,  $C_8 = 10,5$ ,  $C_9 = -385,0$ ,  $C_{10} = 156,2$ .

97

6. Численное интегрирование системы (1) и сравнение полученного фазового портрета с исходным. Проекции трехмерного фазового пространства исходной и вос-



становленной систем показаны на рис. 3, а и б соответственно. Наблюдается топологический изоморфизм указанных траекторий.

Полностью эквивалентные данные были получены для ССТ, что доказывает непричастность нелинейной характеристики ФД к виду наблюдаемого в указанных системах процесса. В данном случае мы имеем дело с влиянием запаздывающей обратной связи и нелинейности в системе нагрева воды. Имея восстановленные уравнения (1), мы по-

Рис. 3. Проекции трехмерных фазовых портретов исходного очищенного от шума (a) и модельного (б) процессов

лучаем мощный инструмент для определения причин возникновения сложной динамики в конкретной системе и выработки действий, необходимых для ее анализа. Поиск параметров реального устройства (в данном случае ССРЧ или ССТ) на практике может быть сведен к методу, включающему повторение измерений при различных параметрах систем обратной связи запаздывания, величина расхода воды и т. п.) с дальнейшей обр (время обработкой определением коэффициентов уравнений (1), соответствующих И указанным выше параметрам реальной системы. В результате мы получаем возможность выделения параметров, оказывающих наибольшее влияние на динамику, и нахождения значений этих параметров, при которых достигается максимальная устойчивость конкретной системы. В случае ССРЧ это означает уменьшение дисперсии фазы поля СВЧ в секции и разброса по энергии ускоренных электронов и в конечном счете более устойчивую работу ускорителя.

Таким образом, используя временную реализацию одной переменной динамической системы, мы восстановили дифференциальные уравнения, дающие топологически эквивалентный исходному аттрактор в фазовом пространстве системы. Нами показана возможность нового подхода к определению источников возникновения сложных динамических режимов на примере систем стабилизации температуры и резонансной частоты секции линейного ускорителя электронов непрерывного действия.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Brush J. S., Kadtke J. B.//Proc. ICASSP-92. San Francisco, 1992. P. 321.
[2] Alimov A. S., Chepurnov A. S., Gribov I. V. et al. Moscow CW racetrack microtron: Preprint N93-9/301, Inst. Nucl. Phys. Mosc. St. Univ. M., 1993.
[3] Teodorescu D.//Int. J. Control. 1989. 50, N 5. P. 1577. [4] Broomhead D. S., King G. P.//Physica D. 1986. 20, N 2. P. 217.

Поступила в редакцию 08.07.93

• ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1994. Т. 35, № 1

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 537.638

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ТЕРБИЯ И ДИСПРОЗИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ В ПАРАМАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ

С. Ю. Даньков, Ю. Ф. Попов, А. М. Тишин

(кафедра общей физики для естественных факультетов)

Проведено детальное исследование намагниченности монокристаллов тербия и диспрозия в области температур магнитных фазовых переходов. Впервые установлено, что переход антиферромагнетизм — парамагнетизм в Тb и Dy сопровождается температурным гистерезисом намагниченности.

Предлагаемая работа посвящена исследованию температурных и полевых зависимостей удельной намагниченности о монокристаллических редкоземельных метал-

98