УДК 621.318

© **А. В. Ходырев**

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В БИСТАБИЛЬНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

§ 1. Стохастический резонанс

Сравнительно недавно авторами работы [1] был введен термин «стохастический резонанс» в ходе исследований модели бистабильного осциллятора, предложенной для описания периодичности наступления ледниковых периодов на Земле. Модель описывала движение частицы в симметричном одномерном бистабильном потенциале под действием периодической силы в условиях большого трения. При этом амплитуда периодического сигнала была достаточно малой для обеспечения переключения одного устойчивого состояния в другое. Такая возможность появлялась при введении дополнительной случайной силы, индуцирующей переходы через потенциальный барьер. Характерной особенностью такого представления является немонотонная («резонансная») зависимость отклика бистабильной системы от интенсивности случайной силы (шума), то есть существует оптимальное значение уровня интенсивности шума, при котором отклик системы максимален. Такое поведение представляет интерес при анализе различных процессов переключений.

Первая реализация стохастического резонанса в лабораторном эксперименте описана в работе [2]. В этой работе установлено, что отношение сигнал/шум на выходе триггера Шмитта при воздействии на него слабыми периодическим и шумовым сигналами возрастает с ростом шума, достигает максимума и затем убывает.

В ходе дальнейших исследований эффект стохастического резонанса был обнаружен во многих системах (и не только физических). Более подробно данные результаты отражены в различных обзорах (см., например, [3, 4]).

§ 2. Математическая модель

Многие магнитные системы естественным образом подходят для изучения возможности стохастического резонанса. Ферромагнетики, перемагничивющиеся одним большим скачком Баркгаузена, представляют собой бистабильную систему и, поэтому, существует возможность реализации в ней эффекта стохастического резонанса. Два устойчивых состояния системы представляют собой намагниченность материала в противоположных направлениях. Переход из одного состояния в другое осуществляется под воздействием внешнего магнитного поля. В качестве случайных процессов в системе могут выступать хаотические положения вектора остаточной намагниченности, обусловленные тепловыми флуктуациями и дефектами структуры.

Ранее [5] для описания большого скачка Баркгаузена использовалась модель с одной потенциальной ямой (одной устойчивой точкой). Для изучения явления стохастического резонанса рассмотрим модель с двумя устойчивыми точками, при этом сохраним все достоинства описания градиента потенциального рельефа использованные ранее. Рассмотрим следующую задачу:

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + F(x) = A\sin(\omega t) + \xi(t); \quad x(0) = k\Delta x, \quad \dot{x}(0) = 0, \tag{1}$$

$$
F(x) = \begin{cases} \dfrac{F_m}{(\Delta x-\lambda)^2}x^2 + \dfrac{2F_m\lambda}{(\Delta x-\lambda)^2}x - \dfrac{F_m\Delta x\,(\Delta x-2\lambda)}{(\Delta x-\lambda)^2} \quad \text{при} \quad -\infty < x < \lambda, \\ -\dfrac{2F_m}{\lambda^3}x^3 - \dfrac{3F_m}{\lambda^2}x^2 \quad \text{при} \quad -\lambda \leqslant \times < 0, \\ -\dfrac{2F_m}{\lambda^3}x^3 + \dfrac{3F_m}{\lambda^2}x^2 \quad \text{при} \quad 0 \leqslant x < \lambda, \\ -\dfrac{F_m}{(\Delta x-\lambda)^2}x^2 + \dfrac{2F_m\lambda}{(\Delta x-\lambda)^2}x + \dfrac{F_m\Delta x\,(\Delta x-2\lambda)}{(\Delta x-\lambda)^2} \quad \text{при} \quad \lambda \leqslant x < \infty, \end{cases} \tag{2}
$$

где $x, \dot{x}, \ddot{x}$ — координата, скорость и ускорение доменной границы (ДГ), m — эффективная масса ДГ, β — коэффициент затухания, $A\sin(\omega t)$ — внешний периодический сигнал, $\xi(t)$ — случайная величина, k — постоянный коэффициент. Функция $F(x) = \dfrac{dU(x)}{dx}$ описывает градиент потенциального рельефа (ГПР), $U(x)$ — симметричный бистабильный потенциал, $\pm\Delta x$ — минимумы потенциальной ямы, F_m и λ — параметры кривизны потенциальной ямы.

Амплитуда внешнего периодического воздействия рассматривается достаточно малой для скачка через барьер в отсутствии случайной (шумовой) компоненты. Значение коэффициента затухания принимает относительно большие значения (что соответствует массивным образцам) и в таком случае эффективную массу ДГ можно не учитывать. Такое представление будет аналогичным модели передемпфированного бистабильного осциллятора, ставшей канонической для изучения стохастического резонанса.

§ 3. Результаты

Результаты численных экспериментов показали, что система имеет два характерных режима: в одном из них происходят случайные колебания в окрестностях одного из состояний равновесия, в другом происходит скачок (переход через потенциальный барьер). Поскольку основным свойством [3] стохастических систем, реализующих эффект стохастического резонанса, является наличие характерного временного масштаба, управляемого изменением интенсивности шума, то подобное поведение рассмотренной модели (1)–(2) позволяет использовать её для изучения данного явления. Таким образом, существует теоретическая возможность осуществления явления стохастического резонанса в бистабильных ферромагнетиках.

Список литературы

1. Benzi R., Sutera A., Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance // J.Phys.A. 1981. V. 14. № 11. p. L453–L457.
2. Fauve S., Heslot F. Stochastic resonance in bistable system // Phys.Lett.A. 1983. V. 97. p. 5–7.
3. Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 1. С. 7–38.
4. Исавнин А. Г. Стохастический резонанс в системе однодоменных магнитных частиц. Набережные Челны: Изд-во Камского госуд. политехн. ин-та. 2004. 160 с.
5. Ломаев Г. В., Петров М. Ю., Ходырев А. В. О математическом моделировании ГПР в процессе переключения бистабильных ферромагнетиков // Вестник Удмуртского университета, серия "Физика". 2005. № 4. С. 195–202.

Ходырев Андрей Викторович
Ижевский государственный
технический ун-т,
Россия, Ижевск
e-mail: AndyHomeMail@gmail.com