Анализ синхронизация спин-трансферных осцилляторов с одноосной симметрией и полевой связью в фазовом приближении

П. В. Купцов[1]

[1] *Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук*

kupav@mail.ru

Спин-трансферный осциллятор — это наноразмерное устройство, которое способно генерировать маломощное СВЧ излучение вследствие прецессии вектора своей намагниченности, возникающей при пропускании через устройство электрического тока. Математическая модель осциллятора задаётся уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта-Слончевского, которое описывает динамику вектора намагниченности. Формально это три скалярных ОДУ, однако так как модуль вектора сохраняется, эффективная размерность фазового пространства равна двум. Из-за большого количества параметров и кубической нелинейности, анализ полного уравнения в общем виде достаточно громоздок [1]. Мы рассматриваем частный случай, когда осциллятор обладает внутренней симметрией относительно оси z, вдоль которой течёт электрический ток [1]. Уравнения для данного случая становятся значительно проще но при этом сохраняют свои ключевые особенности.

Достаточно часто исследуется параметрическое взаимодействие спин-трансферных осцилляторов как электронных устройств, включённых в цепь последовательно или параллельно. Связь возникает из-за того, что электрическое сопротивление осцилляторов меняется вместе с намагниченностью за счёт эффекта гигантского магнитного сопротивления. Такая схема взаимодействия работает как глобальная связь через общее поле и не допускает построения сложных конфигураций взаимодействия. Мы рассматриваем другой тип связи, когда осцилляторы воздействуют друг на друга непосредственно, через создаваемые ими магнитные поля.

Исследуется система двух осцилляторов. Уравнение для первого имеет вид

$$
\begin{aligned}
\dot{m}_{1,x} =& m_{1,z}A_1 m_{1,x} + B_1 m_{1,y} + \epsilon\left\{\alpha[m_{2,x} - (\vec{m}_1\cdot\vec{m}_2)m_{1,x}] - m_{1,y}m_{2,z} + m_{2,y}m_{1,z}\right\},\\
\dot{m}_{1,y} =& - B_1 m_{1,x} + m_{1,z}A_1 m_{1,y} + \epsilon\left\{\alpha[m_{2,y} - (\vec{m}_1\cdot\vec{m}_2)m_{1,y}] + m_{1,x}m_{2,z} - m_{2,x}m_{1,z}\right\},\\
\dot{m}_{1,z} =& A_1(m_{1,z}^2 - 1) + \epsilon\left\{\alpha[m_{2,z} - (\vec{m}_1\cdot\vec{m}_2)m_{1,z}] - m_{1,x}m_{2,y} + m_{2,x}m_{1,y}\right\},
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где $A_1 = (m_{1,z} - h_z + \beta_1/\alpha)\alpha$, $B_1 = m_{1,z} - h_z - \beta_1\alpha$, а уравнение для второго получается заменой индексов $1 \leftrightarrow 2$. Система уравнений имеет пять управляющих параметров: α отвечает за затухание, h_z — внешнее магнитное поле, β_1 и β_2 управляют собственными частотам осцилляторов, ϵ задаёт силу связи.

Синхронизация в системе (1) рассматривается в фазовом приближении для случай малой расстройки собственных частот, т. е. когда $\beta_1 - \beta_2$ мало, и слабой связи ϵ. Задавая решение в виде $m_{1,2,x} = \sqrt{1-a^2}\cos\phi_{1,2}(t)$, $m_{1,2,y} = \sqrt{1-a^2}\sin\phi_{1,2}(t)$, $m_{1,2,z} = a$, где a — постоянная амплитуда, а $\phi_{1,2}$ зависящие от времени фазы первого и второго осцилляторов, мы находим выражения для амплитуды и стационарной разности фаз $\psi = \phi_1 - \phi_2$ в режиме синхронизации:

$$a = h_z - (\beta_1 + \beta_2)/(2\alpha), \;\; \sin\psi = (\beta_1 - \beta_2)/(2\epsilon), \tag{2}$$

а также получаем фазовое уравнение Адлера-Хохлова [2, 3] $\dot{\psi} = \delta - \mu\sin\psi$, где параметры δ, имеющий смысл частотной расстройки, и μ, играющий роль параметра связи, для систмы (1) имеют вид:

$$\delta = \alpha(\beta_1 - \beta_2)/(\alpha^2 + 1), \;\; \mu = 2\epsilon\alpha/(\alpha^2 + 1). \tag{3}$$

Из уравнения Адлера-Хохлова получаем выражение для языка синхронизации

$$|\beta_1 - \beta_2| = 2\epsilon. \tag{4}$$

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №21-12-00121, https://rscf.ru/project/21-12-00121/.

[1] I. D. Mayergoyz, G. Bertotti, C. Serpico, *Nonlinear magnetization dynamics in nanosystems*, Elsevier, 2009.

[2] R. Adler, Proc. of the I.R.E. and Waves and Electrons, 34(6), 351-357 (1946).

[3] Р. В. Хохлов, ДАН СССР, 97(3), 411-414, (1954).