

Асинхронные колебания в ансамбле взаимосвязанных спин-трансферных наноосцилляторов

Исследованы асинхронные колебания в ансамбле взаимосвязанных общим током спин-трансферных наноосцилляторов в симметричном режиме. Исследована устойчивость одновременных колебаний в ансамбле связанных генераторов, число которых может быть произвольным. Показано, что с увеличением числа источников мощность магнитоэлектрических волн каждого генератора в составе ансамбля уменьшается.

Ключевые слова: спин-трансферный наноосциллятор, асинхронные колебания

В последние годы в связи с бурным развитием нанотехнологий и возможностью создания магнитных пленок в десятки и единицы нанометров возникли новые перспективы использования спин-волновой электроники. Одним из наиболее многообещающих направлений является создание генераторов СВЧ и ТГц колебаний мультислойными структурами с включением ферромагнитных и антиферромагнитных слоев [1-5]. Принцип работы таких генераторов (т.н. «спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО)») заключается в генерации колебаний при пропускании через образец, состоящий из чередующихся магнитных и немагнитных слоев, электрического тока высокой плотности. Генерация возникает за счет эффектов переноса крутильного момента и спиновой инжекции от одного слоя к другому (см. подробнее [1-2, 4]). СТНО обладают большим числом положительных качеств, отличающих их от современных генераторов СВЧ: широкий диапазон перестройки, миниатюрные размеры, малые питающие напряжения. Несмотря на это у них имеются и существенные недостатки, ограничивающие на данный момент их практическое использование. К главному недостатку относится низкий уровень выходной мощности единичных образцов (в лучшем случае до 0,5 мкВт). В связи с этим были предложены и исследованы различные механизмы связи между СТНО с целью синхронизации и сложения их мощностей (см. [6-9]). К одному из самых простых в технологическом исполнении механизмов связи относится связь общим током (общей микроволновой компонентой тока). Такой механизм связи и схема ансамбля, состоящего из большого числа элементов была предложена в работе [6] и достаточно подробно исследовалась [7-8]. В большинстве работ исследовались устойчивые режимы одночастотных (синхронных колебаний). Вместе с тем, возникновение дополнительных, паразитных типов колебаний в схемах сложения мощности является нежелательным. Подобные колебания ухудшают стабильность и энергетическую эффективность схемы и загрязняют спектр генерируемого сигнала. Поэтому изучение многочастотных колебаний в ансамбле взаимосвязанных СТНО является важным, так как позволяет определить условия отсутствия паразитных типов колебаний. Применение автоколебательных систем с несколькими степенями свободы также определяется возможностью их практического применения для деления и

умножения частоты, частотной и фазовой модуляции. Исследованию устойчивости колебательных процессов в многочастотных радиотехнических ансамблях автогенераторов посвящено большое число работ (см. напр. [10-11] и литературу в них).

В данной работе исследуется устойчивость асинхронных колебаний в ансамбле связанных общим током, симметричных СТНО. Структурные схемы последовательного и параллельного включения СТНО общим током показаны на рис. 1а,б. Здесь введены следующие обозначения: I_0 - питающий ток, R_H - сопротивление нагрузки, L_0, C_0 - блокировочные индуктивность и емкость и R_1, \dots, R_N - сопротивления СТНО (всего N СТНО). Приведем расчетные соотношения для определения устойчивости одновременных колебаний в ансамбле последовательно связанных СТНО, представленном на рис.1а. В этом приближении собственные частоты СТНО не находятся в соотношении целых чисел.

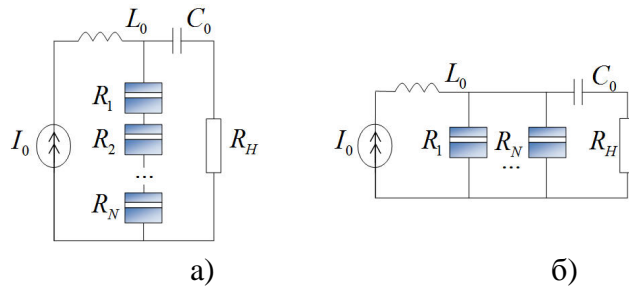


Рисунок 1

Упрощенной математической моделью единичного СТНО является уравнение, предложенное А. Славным и В. Тиберкевичем в [3], записываемое относительно комплексной амплитуды c_i i -ого СТНО в следующем виде:

$$\frac{dc_i}{dt} + j\omega(|c_i|)c_i + \Gamma_+(|c_i|)c_i - \Gamma_-(c_1, \dots, c_N)c_i = 0. \quad (1)$$

Здесь $\omega(|c_i|) = \omega_{0i} + N_i |c_i|^2$ - зависимость частоты колебаний СТНО от мощности спиновой волны $|c_i|^2$, $\Gamma_+(|c_i|) = \Gamma_G(1 + Q|c_i|^2)$ - коэффициент, характеризующий положительные потери генератора, а $\Gamma_-(c_1, \dots, c_N)$ - коэффициент, характеризующий отрицательные потери и зависящий в общем случае от амплитуд остальных генераторов c_1, \dots, c_N , имеющий достаточно сложную форму (см. подробнее [3,6]). Соответствующая функция $\Gamma_-(|c_i|)$ для последовательного соединения СТНО (см. рис. 1а) и симметричного режима $c_1 = c_i = \dots = c_N$, представим в виде (см. [6]):

$$\Gamma_- = \sigma I_0 \cdot \beta_R \cdot (1 + N\beta_{\Delta R} \cos(\gamma_p - \theta)) (1 - Q_s |c_i|^2), \quad (2)$$

где $Q_s = \frac{1 + 3N\beta_{\Delta R} \cos(\gamma_p - \theta)}{1 + N\beta_{\Delta R} \cos(\gamma_p - \theta)}$, $\beta_{\Delta R} = \frac{\Delta R}{R_H + N \cdot R_0}$, $\beta_R = \frac{R_H}{R_H + N \cdot R_0}$ - коэффициенты, связанные со связью СТНО общим током, учитывающее сопротивление нагрузки R_H и характеристические сопротивления СТНО R_0 и ΔR (типичные значения для металлических структур $R_0 \approx 0.1 \text{ Ом}$ и $\Delta R_0 \approx 0.03 \text{ Ом}$). В формулах (1), (2) также введены

следующие обозначения: $\omega_0 = \sqrt{\omega_H (\omega_H + \omega_M \cos^2 \theta_i)}$ - частота собственных колебаний СТНО и $\omega_H = \gamma H_i$, $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$ (γ - гиромагнитное отношение, H_i и θ_i - внутренне магнитное поле и угол его приложения относительно плоскости образца СТНО, M_0 - намагниченность насыщения, γ_p - угол между вектором намагниченности поляризатора и

плоскостью образца); $N = \frac{\omega_H \omega_M}{2\omega_0} \left(\frac{3\omega_H^2 \sin^2 \theta_i}{\omega_0^2} - 1 \right)$ - параметр неизохронности;

$\Gamma_G = \alpha_G \omega_0 (\partial \omega_0 / \partial \omega_H)$ - коэффициент положительных спин-волновых потерь СТНО (α_G - параметр затухания Гильберта); $\sigma = (\varepsilon g \mu_B) / (2eM_0V)$ - коэффициент, характеризующий эффект переноса спина [1-3], $\varepsilon \leq 1$ - коэффициент эффективности спиновой поляризации [3], $g = 2$ - фактор спектроскопического расширения, μ_B - магнетон Бора, $V = d \cdot S$ - объем рабочего слоя СТНО, d - его толщина, а S - площадь; $Q \gg 1$.

Перейдем (см. подробнее (3)) от одного уравнения для комплексной амплитуды $c_i = U_i \exp(j\varphi_i)$ (1) к двум уравнениям относительно амплитуды U_i и фазы φ_i . Соответствующая система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{dU}{dt} = \Gamma_G (\zeta \cdot \beta \cdot Q_s + Q) [p_0 - U^2] U, \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 + N \cdot U^2, \quad (4)$$

где $\zeta = \sigma I_0 / \Gamma_G = I_0 / I_{KP}$ - фактор самовозбуждения несвязанного СТНО (параметр регенерации), I_{KP} - критический ток, при котором стартуют колебания в этом случае,

$\beta = \beta_R (1 + N \beta_{\Delta R} \cos(\gamma_p - \theta))$ и $p_0 = \frac{\zeta \cdot \beta - 1}{\zeta \cdot \beta \cdot Q_s + Q}$ - мощность стационарных колебаний

единичного генератора. Из (3) и анализа уравнений для вариаций $\xi = U - \sqrt{p_0}$ находим, что возникновение симметричного режима в ансамбле связанных СТНО возможно при $\zeta > 1/\beta$. Соответствующая зависимость мощности стационарных колебаний представлена на рис.2а для различного количества N элементов в ансамбле. Как видно критический ток $I'_{KP}(N)$ с ростом количества генераторов N увеличивается, а мощность при одном и том же факторе самовозбуждения уменьшается. Зависимость частоты стационарных $f = \omega_{cm} / 2\pi$ колебаний от фактора самовозбуждения ζ , полученная из (4), представлена на рис.2б. Из него видно, что при фиксированном факторе самовозбуждения и увеличении количества генераторов, частоты стационарных колебаний увеличиваются, что связано с нелинейной зависимостью частоты колебаний СТНО от амплитуды (неизохронность генераторов).

Графики на рис.2 построены для следующих физических параметров: $\omega_H = 2\pi \cdot 28 \cdot 10^9 \text{ рад} / \text{с}$, $\omega_M = 2\pi \cdot 22.4 \cdot 10^9 \text{ рад} / \text{с}$, $\theta_i = 0^\circ$, $\alpha_G = 0.01$, $\varepsilon = 0.1$, $g = 2$, $d = 5 \text{ нм}$, $S = \pi R_c^2$ и $R_c = 50 \text{ нм}$, $R_H = 50 \text{ Ом}$, $\gamma_p = 0^\circ$.

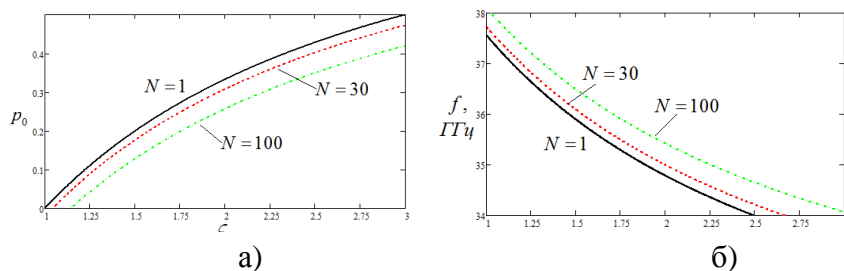


Рисунок 2

Таким образом, можно заключить, что асинхронные колебания в ансамбле последовательно соединенных симметричных генераторов возможны в случае, если $I_0 > I_{KP} / \beta$, причем с увеличением количества элементов в ансамбле амплитуда стационарных колебаний падает, а частота увеличивается. Аналогичная ситуация наблюдается и для параллельной схемы, изображенной на рис.1б с другим коэффициентом β . Несимметричные и частично симметричные ансамбли СТНО должны рассматриваться особо и для этих случаев, аналитические выражения для возникновения неустойчивости удастся получить только для малых ансамблей (2-3). Исследование более сложных схем составляет предмет отдельного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13_08_012783)

Библиографический список

1. Slonczewski J. C. Current-driven excitation of magnetic multilayers // J. Magn. Magn. Mater. – 1996. - Vol. 159. -pp. L1–L7.
2. Berger L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current // Phys. Rev. B. -1996. - Vol. 54. - pp. 9353–9358.
3. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear auto-oscillator theory of microwave generation by spin-polarized current // IEEE Trans. on Magn. -2009. – Vol. 45. - No. 4. – pp. 1875-1918.
4. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Панас А.И., Эпштейн Э.М. Спинтроника: обменное переключение ферромагнитных металлических переходов при малой плотности тока // Усп. физ. наук. – 2009. – Том 179. - № 4. С. 359-368.
5. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Михайлов Г.М., Чигарев С.Г. Генерация терагерцовых волн током в магнитных переходах // Письма в ЖЭТФ. – 2013. – Том 98. – Вып. 11. С. 837-847.
6. Grollier J., Cros V., Fert A. Synchronization of spin-transfer oscillators driven by stimulated microwave currents // Phys. Rev. B 73. – 2006. – Vol.73. – 060409.
7. Georges B., Grollier J., Cros V., Fert A. Impact of the electrical connection of spin transfer nano-oscillators on their synchronization: an analytical study // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 92. – 232504.
8. Tiberkevich V., Slavin A., Bankowski E., Gerhart G. Phase-locking and frustration in an array of nonlinear spin-torque nanooscillators // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 95. – 262505.
9. Сафин А.Р., Капранов М.В., Удалов Н.Н. Особенности взаимной синхронизации неидентичных спин-трансферных наноосцилляторов // Радиотехника. – 2013. - № 10. – С.43-47.
10. Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М. Теория колебаний в радиотехнике // - Москва: Наука. – 1984.
11. Дворников А.А., Уткин Г.М. Автогенераторы в радиотехнике // Москва: Радио и связь. – 1991.