

УДК 519.63

DOI: 10.31040/2222-8349-2025-0-1-26-30

**СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ МАГНИТНЫХ ВИХРЕЙ
В МНОГОСЛОЙНОМ СПИН-ТРАНСФЕРНОМ НАНООСЦИЛЛЯТОРЕ**

© Е.Г. Екомасов, Д.Ф. Нерадовский, Н.Г. Пугач, В.Н. Назаров

Исследуется связанная динамика магнитных вихрей в спин-трансферных наноосцилляторах. Спин-трансферным наноосциллятором называется структура, в которой за счет эффекта переноса спинового момента между спин-поляризованным током и намагниченностью возбуждается прецессия намагниченности. Ранее хорошо изучен случай спин-трансферного наноосциллятора, который представляет собой трехслойный нанопильон, где два магнитных слоя разделены немагнитной проводящей прослойкой. В пермаллоевых нанопильонах определенных размеров магнитный вихрь может быть реализован как основное состояние. Для двухвихревых спин-трансферных наноосцилляторов найдены две частоты для гиротропной моды стационарных связанных осцилляций вихрей. Одна из этих частот больше частоты, полученной для случая одного вихря, а вторая меньше. В данной работе рассмотрен случай спин-трансферного наноосциллятора цилиндрической формы, состоящего из четырех произвольных по толщине пермаллоевых магнитомягких магнитных слоев, разделенных тремя немагнитными проводящими слоями. Каждый из магнитных слоев содержит магнитный вихрь как основное состояние. Для приближенного аналитического исследования стационарной динамики таких вихрей одинаковой киральности можно использовать эффективные уравнения Тили для векторов центров магнитных вихрей. В потенциальной энергии такой системы, в приближении парного взаимодействия, учитывается квазиупругая энергия отклонения вихря от положения равновесия и энергия взаимодействия вихрей, связанная с магнитостатическим взаимодействием. Решения эффективных уравнений движения искались в предположении, что они в установившемся режиме имеют вид гармонических колебаний. Это позволяет свести систему дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений. Аналитическое решение такой системы уравнений может быть получено для случая одинаковых по размерам магнитных и немагнитных слоев. Проведено сравнение полученных четырех частот таких колебаний со случаем вихревого спин-трансферного наноосциллятора с тремя, двумя и одним свободными магнитными слоями. Показано, что для четырех магнитных слоев с одинаковыми геометрическими и физическими параметрами, существует максимальная собственная частота, которая больше соответствующих максимальных частот для систем с одним, двумя или тремя магнитными слоями.

Ключевые слова: магнитный вихрь, стационарная динамика, спин-трансферный наноосциллятор, мультислойные наноструктуры, спинтроника.

Введение. Магнитоэлектрические эффекты в настоящее время широко используются для создания новых устройств спинтроники (см., например, [1, 2]). В магнитных наноструктурах за счет эффекта переноса спинового момента между током и намагниченностью может возникнуть прямое взаимодействие. Структуры, в которых так возбуждается прецессия

намагниченности, называются спин-трансферными наноосцилляторами (СТНО). Ранее хорошо изучены структуры, где СТНО представляют собой нанопильоны, где два магнитных слоя разделены немагнитной проводящей прослойкой [1]. В пермаллоевых нанопильонах определенных размеров магнитный вихрь может быть реализован как основное состояние [1].

ЕКОМАСОВ Евгений Григорьевич – д.ф.-м.н., Уфимский университет науки и технологий, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы,

e-mail: ekomasoveg@gmail.com

НЕРАДОВСКИЙ Денис Федорович, Тюменский государственный университет,

e-mail: denner198123@gmail.com

ПУГАЧ Наталья Григорьевна – к.ф.-м.н., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», e-mail: prugach@hse.ru

НАЗАРОВ Владимир Николаевич – к.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, e-mail: nazarovvn@gmail.com

Вихревые СТНО характеризуются тем, что их магнитные слои содержат магнитный вихрь. Отметим, что практический интерес к таким структурам не ограничивается СТНО [3–4]. В таких структурах найдена гиротропная мода, соответствующая круговому трансляционному движению вихря в диске вокруг его центра. Показано, что для описания гиротропного движения вихря можно использовать уравнения Тилля. Метод построения уравнений на основе метода коллективных переменных для гироскопической динамики вихрей в нанодиске приведен, например, в [1, 5]. При выводе таких уравнений был использован предложенный в [6] аналитический анзац, описывающий минимизирующую магнитостатическую энергию, структуру статического магнитного вихря. Было получено, что частота осцилляций вихревого ядра вокруг геометрического центра нанодиска имеет линейную зависимость от соотношения геометрических размеров диска.

Динамика магнитостатически связанных магнитных вихрей в двухвихревых СТНО (см. например [1, 5, 7–9]) сильно зависит от взаимной ориентации намагниченности в центре (или коре) вихря. В такой системе связанных вихрей увеличивается число возможных состояний, определяемых параметрами полярности и киральности вихрей, которое можно использовать для прикладных целей, например, при создании магнитной памяти. В данном случае найдены две частоты для гиротропной моды стационарных связанных осцилляций вихрей [5]. Причем одна из этих частот больше частоты, полученной для случая одного вихря, а вторая меньше. Полученные аналитические решения качественно описывают известные экспериментальные и численные результаты [8–12]. Для случая пятислойной структуры с тремя магнитными слоями пока проведено крайне ограниченное количество исследований. В основном исследовался случай однородно намагниченного одного свободного магнитного слоя [13–15]. Для случая семислойной структуры с четырьмя магнитными слоями нами не найдено ни одного исследования. Отметим, что в [16] решена задача о нахождении собственных частот коллективных магнитных вихревых колебаний для кластера из четырех пермаллоевых одинаковых нанодисков, расположенных в форме квадрата в одной плоскости. В данной работе проведен анализ динамики четырех магнитостатически связанных вихрей семислойной цилиндрической структуре.

Основные уравнения и результаты. Рассмотрим проводящий семислойный нанодиск, четыре слоя которого магнитные из пермаллоя, а лежащие между ними, слои немагнитные (рис. 1). Состав пермаллоя – $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, его краткое обозначение Py . Пусть в каждом из магнитных слоев существует магнитный вихрь, как основное состояние. Для приближенного аналитического исследования стационарной динамики таких вихрей одинаковой киральности и полярности можно использовать эффективные уравнения для векторов $\vec{r}_1(t)$, $\vec{r}_2(t)$, $\vec{r}_3(t)$ и $\vec{r}_4(t)$, определяющих положения центров вихрей [14]. Рассмотрим стационарную динамику системы четырех связанных вихрей. Энергию этой системы в приближении парного взаимодействия напишем следующим образом:

$$W(\{\vec{r}_j\}_{j=1,4}) = \frac{1}{2} \sum_{1 \leq j \leq 4} K_j \vec{r}_j^2 + \sum_{1 \leq j \leq 3} \mu_j (\vec{r}_j \cdot \vec{r}_{j+1}), \quad (1)$$

где K_j – коэффициент квазиупругости j -го вихря; μ_1 , μ_2 , μ_3 – коэффициенты, которые определяют магнитостатическую энергию парного взаимодействия соседних вихрей. Для приближенного аналитического исследования стационарной динамики таких вихрей можно использовать эффективные уравнения для векторов $\vec{r}_j(t)$:

$$\vec{G}_j \times \dot{\vec{r}}_j - \frac{\partial}{\partial \vec{r}_j} W = 0, \quad (2)$$

где $\vec{G}_j = -G_j \cdot \vec{e}_z$; $G_j = 2\pi L_j (M_{js} / \gamma)$; M_{js} – намагниченность насыщения j -го слоя, γ – гиромагнитное отношение, L_j – толщина j -го слоя, W – энергия системы, определяемая формулой (1).

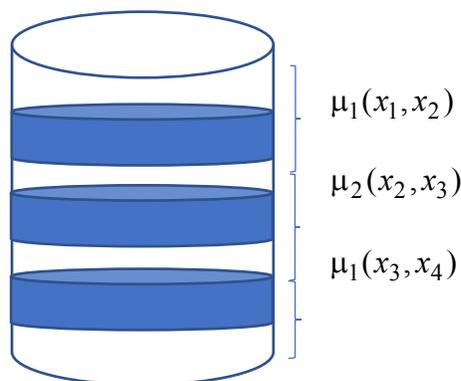


Рис. 1

Будем полагать, что решение уравнений (2) в установившемся режиме имеют вид гармонических колебаний:

$$\vec{r}_j(t) = \vec{r}_{0j} \exp(i\omega t); \quad j = \overline{1,4}. \quad (3)$$

Подстановка (3) в уравнения (2) приводит к системе линейных алгебраических уравнений, которая может быть написана следующим образом.

$$\begin{cases} (G_1\omega - K_1)\vec{r}_1 - \mu_1\vec{r}_2 + 0 \cdot \vec{r}_3 + 0 \cdot \vec{r}_4 = 0 \\ -\mu_1\vec{r}_1 + (G_2\omega - K_2)\vec{r}_2 - \mu_2\vec{r}_3 + 0 \cdot \vec{r}_4 = 0 \\ 0 \cdot \vec{r}_1 - \mu_2\vec{r}_2 + (G_3\omega - K_3)\vec{r}_3 - \mu_3\vec{r}_4 = 0 \\ 0 \cdot \vec{r}_1 + 0 \cdot \vec{r}_2 - \mu_3\vec{r}_3 + (G_4\omega - K_4)\vec{r}_4 = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Условие разрешимости системы уравнений (4) может быть найдено из детерминанта:

$$\det \begin{pmatrix} G_1\omega - K_1 & -\mu_1 & 0 & 0 \\ -\mu_1 & G_2\omega - K_2 & -\mu_2 & 0 \\ 0 & -\mu_2 & G_3\omega - K_3 & -\mu_3 \\ 0 & 0 & -\mu_3 & G_4\omega - K_4 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

и записано в виде характеристического уравнения для частоты ω , которое имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} &\omega^4 - (\omega_{01} + \omega_{02} + \omega_{03} + \omega_{04})\omega^3 + \\ &+ (\omega_{03}\omega_{04} + \omega_{02}\omega_{04} + \omega_{02}\omega_{03} + \omega_{01}\omega_{04} + \\ &+ \omega_{01}\omega_{02} + \omega_{01}\omega_{03} - \Omega_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2)\omega^2 - \\ &- \omega_{02}\omega_{03}\omega_{04} + \omega_{01}\omega_{03}\omega_{04} + \omega_{01}\omega_{02}\omega_{04} + \\ &+ \omega_{01}\omega_{02}\omega_{03} - \omega_{01}(\Omega_2^2 + \Omega_3^2) - \omega_{02}\Omega_3^2 - \\ &- \omega_{03}\Omega_1^2 - \omega_{04}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2))\omega + \Omega_1^2\Omega_3^2 - \omega_{01}\omega_{02}\Omega_3^2 - \\ &- \omega_{01}\omega_{04}\Omega_2^2 - \omega_{03}\omega_{04}\Omega_1^2 + \omega_{01}\omega_{02}\omega_{03}\omega_{04} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \omega_{01} &= \frac{k_1}{G_1}, \quad \omega_{02} = \frac{k_2}{G_2}, \quad \omega_{03} = \frac{k_3}{G_3}, \quad \omega_{04} = \frac{k_4}{G_4}, \\ \frac{\mu_1^2}{G_1G_2} &= \Omega_1^2, \quad \frac{\mu_2^2}{G_2G_3} = \Omega_2^2, \quad \frac{\mu_3^2}{G_3G_4} = \Omega_3^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Полученное уравнение (6) имеет громоздкий вид. Для получения его аналитического решения рассмотрим простой случай одинаковых слоев. Тогда это уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned} &\omega^4 - 4\omega_0\omega^3 + (6\omega_0^2 - 3\Omega^2)\omega^2 - \\ &- (4\omega_0^3 - 6\omega_0\Omega^2)\omega + \Omega^4 - 3\omega_0^2\Omega^2 + \omega_0^4 = 0' \end{aligned} \quad (8)$$

где $\omega_0 = K/G$, $\Omega = \mu/G$.

Решение уравнения (8) методом Феррари позволяет найти собственные частоты связанной динамики четырех вихрей. Приведем полученный результат:

$$\omega_{1,2} = \omega_0 \pm \sqrt{\frac{3-\sqrt{5}}{2}}\Omega, \quad \omega_{3,4} = \omega_0 \pm \sqrt{\frac{3+\sqrt{5}}{2}}\Omega. \quad (9)$$

Из уравнения (8) можно получить частоты для колебаний вихрей и для случаев $N=1,2,3$.

Для случая одного магнитного слоя имеем одну частоту $\omega_0 = K/G$ совпадающую с известной для этого случая. Для случая двух магнитных слоев имеем две частоты $\omega_{1,2} = \omega_0 \mp \mu/G$, совпадающие с известными для этого случая. Для случая трех магнитных слоев имеем $\omega_1 = \omega_0 - \sqrt{2}\tilde{\mu}$, $\omega_2 = \omega_0$, $\omega_3 = \omega_0 + \sqrt{2}\tilde{\mu}$. Сравнение этих частот с частотами (9) показывает, что для четырех магнитных слоев с одинаковыми параметрами, существует максимальная собственная частота, которая больше соответствующих максимальных частот для систем с одним, двумя или тремя магнитными слоями.

Выводы. В данной работе рассмотрен спин-трансферный наноосциллятор цилиндрической формы, состоящий из четырех произвольных по толщине магнитных слоев разделенных тремя немагнитными проводящими слоями. Теоретическое описание связанной динамики вихрей проводилось на основе эффективных уравнений Тилиа для координат центров вихрей с учетом в энергии вихрей квазиупругой энергии каждого вихря и энергии связи вихрей в приближении ближайших соседей. Для режима стационарной связанной динамики вихрей получено алгебраическое уравнение четвертого порядка для определения зависимости частот от параметров системы. Для случая одинаковых слоев найдены четыре частоты стационарной связанной динамики вихрей. Показано, что для четырех магнитных слоев с одинаковыми параметрами, существует максимальная собственная частота, которая больше соответствующих максимальных частот для систем с одним, двумя или тремя магнитными слоями.

Работа выполнена при поддержке проекта «Зеркальные лаборатории» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы.

Литература

1. Звездин К.А., Екомасов Е.Г. Спиновые токи и нелинейная динамика вихревых спин-трансферных наноосцилляторов // Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123. С. 219 [Zvezdin K.A., Ekomasov E.G. Spinovye toki i nelinejnaya dinamika vihrevykh spin-transfernykh nanooscilyatorov // Fizika metallov i metallovedenie, 2022, vol. 123, 219 p. (in Russian)]
2. Гареева З.В., Трочина А.М., Гареев Ш.Т. Магнитоэлектрические эффекты и новые логические устройства спинтроники // Известия Уфимского научного центра РАН. 2023. № 1. С. 65 [Gareeva Z.V., Trochina A.M., Gareev S.H.T. Magnitoelektricheskie efekty i novye logicheskie ustrojstva spintroniki // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN, 2023, no 1, 65 p. (in Russian)]
3. Nakano K., Chiba D., Ohshima N., Kasai S., Sato T. et al. All-electrical operation of magnetic vortex core memory cell // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. P. 262505.
4. Grollier J., Querlioz D., Camsari K.Y., Everschor-Sitte K., Fukami S., Stiles M.D. Neuromorphic spintronics // Nat Electron. 2020. V. 3. P. 360.
5. Guslienko K.Yu., Buchanan K.S., Bader S.D., Novosad V. Dynamics of coupled vortices in layered magneticnanodots // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 223112.
6. Усов Н.А., Песчаный С.Е. Вихревое распределение намагниченности в тонком ферромагнитном цилиндре // Физика металлов и металловедение. 1994. Т. 78. № 6. С. 13.
7. Cherepov B.C., Koop A.Y., Galkin R.S. Khymyn B.A., Ivanov D.C., Worledge V., Korenivskii. Core-core dynamics in spin vortex pairs // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 097204.
8. Locatelli N., Ekomasov A.E., Khvalkovskiy A.V., Azamatov S.A., Zvezdin K.A., Grollier J., Ekomasov E.G., Cros V. Reversal process of a magnetic vortex core under the combined action of a perpendicular field and spin transfer torque // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. P. 062401.
9. Hanif A., Rahim A.A., Maab H. Vortex dynamics in a spin valve nanopillar having hybrid polarizer and magnetostatic coupling // Physica B: Condensed Matter. 2023. V. 668. P. 415203.
10. Stepanov S., Ekomasov A., Zvezdin K., Ekomasov E. Dynamics of coupled magnetic vortices in trilayer conducting nanocylinder // Phys. the Solid State. 2018. V. 60. № 6. P. 1055.
11. Ekomasov A.E., Stepanov S.V., Zvezdin K.A., Ekomasov E.G. Spin current induced dynamics and polarity switching of coupled magnetic vertices in three-layer nanopillars // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2019. V. 471. P. 513.
12. Stepanov S.V., Nazarov V.N., Zvezdin K.A., Ekomasov E.G. Edge vortices and C-state in vortex spin torque nanooscillators // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022. V. 562. P. 169758.
13. Lacoste B., Marins de Castro M., Devolder T., Sousa R.C., Buda-Prejbeanu L.D., Auffret S., Ebels U., Ducruet C., Prejbeanu I.L., Vila L., Rodmacq B., Dieny B. Modulating the spin transfer torque switching dynamics with two orthogonal spin-polarizers by varying the cell aspect ratio // ArXiv:1407.6240v2 [cond-mat.mes-hall] 3 Dec 2014
14. Zaspel C.E., Galkina E.G., Ivanov B.A. High-Frequency Current-Controlled Vortex Oscillations in Ferrimagnetic Disks // Phys. Rev. Applied. 2029. V. 12. P. 044019.
15. Chun-Yeol You. Micromagnetic Simulations for Spin Transfer Torque in Magnetic Multilayers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. V. 17. P. 73.
16. Sukhostavets O.V., Guslienko K.Y. Fine structure of excitation spectra of magnetic vortex dot clusters // Applied Physics Express. 2015. V. 8. P. 023002.

STATIONARY MODE OF COUPLED OSCILLATIONS OF MAGNETIC VORTICES IN A MULTILAYER SPIN-TRANSFER NANOSCILLATOR

© E.G. Ekomasov^{1,2}, D.F. Neradovskii³, N.G. Pugach⁴, V.N. Nazarov⁵

¹Ufa University of Science and Technology,
32, ulitsa Zaki Validi, 450076 Ufa, Russian Federation

²Akmullah Bashkir State Pedagogical University,
3a, ulitsa Oktyabrskoy revolyutsii, 450008, Ufa, Russian Federation

³University of Tyumen,
6, ulitsa Volodarskogo, 625003, Tyumen, Russian Federation

⁴National Research University «Higher School of Economics»
11, ulitsa Myasnitskaya, 101000, Moscow, Russian Federation

⁵Institute of Molecule and Crystal Physics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences
151, prospect Oktyabrya, 450075, Ufa, Russian Federation

The coupled dynamics of magnetic vortices in spin-transfer nanooscillators is investigated. A spin-transfer nanooscillator is a structure in which the precession of magnetization is excited due to the effect of spin moment transfer between the spin-polarized current and magnetization. The case of a spin-transfer nanooscillator, which is a three-layer nanocylinder, where two magnetic layers are separated by a non-magnetic conducting interlayer, has been well studied previously. In permalloy nanocylinders of certain sizes, a magnetic vortex can be realized as the ground state. For two-vortex spin-transfer nanooscillators, two frequencies for the gyrotropic mode of stationary coupled oscillations of vortices are found. One of these frequencies is higher than the frequency obtained for the case of a single vortex, and the second is lower. In this paper, we consider a case of a cylindrical spin-transfer nanooscillator consisting of four permalloy soft magnetic layers of arbitrary thickness separated by three non-magnetic conducting layers. Each of the magnetic layers contains a magnetic vortex as a ground state. For an approximate analytical study of the stationary dynamics of such vortices of the same chirality, one can use the effective Thiel equations for the vectors of the centers of magnetic vortices. In the potential energy of such a system, in the approximation of pair interaction, the quasi-elastic energy of the deviation of the vortex from the equilibrium position and the energy of interaction of vortices associated with magnetostatic interaction are taken into account. Solutions to the effective equations of motion were sought under the assumption that they have the form of harmonic oscillations in the steady-state mode. This allows us to reduce the system of differential equations to a system of algebraic equations. An analytical solution to such a system of equations can be obtained for the case of magnetic and non-magnetic layers of the same size. A comparison of the obtained four frequencies of such oscillations with the case of a vortex spin-transfer nanooscillator with three, two and one free magnetic layers is carried out. It is shown that for four magnetic layers with identical geometric and physical parameters, there is a maximum natural frequency, which is greater than the corresponding maximum frequencies for systems with one, two or three magnetic layers.

Keywords: magnetic vortex, stationary dynamics, spin-transfer nanooscillator, multilayer nanostructures, spintronics.