

Взаимная синхронизация ансамблей спинтронных наноосцилляторов

Л. А. Цырульникова^{1,2✉}, Д. А. Фролов¹, А. Р. Сафин^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

²Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

✉ mila.tsyrulnikova@gmail.com

Аннотация

Введение. Использование спинтронной компонентной базы значительно повышает быстродействие, уменьшает размеры и снижает энергопотребление современных электронных устройств. Неотъемлемой частью спинтронных устройств является спинтронный осциллятор (СО). Связывание многих СО (> 100) в ансамбли с дальнейшей синхронизацией позволяет нивелировать такие недостатки СО, как малая выходная мощность и высокие фазовые шумы, так как выходная мощность ансамбля СО увеличивается в сравнении с единственным осциллятором, в то время как ширина спектральной линии ансамбля уменьшается.

Цель работы. Исследование влияния топологии связи, механизмов связи и отказов в работе СО на синхронизацию ансамбля осцилляторов.

Материалы и методы. Для упрощения численного моделирования синхронизации ансамбля N связанных СО была использована фазовая модель Курамото.

Результаты. Получено уравнение Курамото для фаз связанных в ансамбль СО, продемонстрировано влияние топологии связи и отказов в работе СО на параметры синхронизации ансамбля N связанных осцилляторов.

Заключение. Показано, что для наименьшего времени перехода ансамбля СО в синхронный режим предпочтительнее выбирать топологии с большим числом связей между осцилляторами (например, "все со всеми"). На основании полученных результатов сделан вывод о преимуществах локальной связи ансамбля СО общим током, обеспечивающей топологию ансамбля "все со всеми", благодаря чему время перехода ансамбля СО в синхронный режим наименее зависимо от отказов в работе осцилляторов и увеличения количества синхронизируемых СО.

Ключевые слова: спинтронный осциллятор, ансамбли спинтронных осцилляторов, синхронизация, модель Курамото, топология связи, отказ осциллятора, механизмы связи

Для цитирования: Цырульникова Л. А., Фролов Д. А., Сафин А. Р. Взаимная синхронизация ансамблей спинтронных наноосцилляторов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 5. С. 65–76. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-65-76

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания РФ в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Статья поступила в редакцию 26.08.2024; принята к публикации после рецензирования 21.10.2024; опубликована онлайн 29.11.2024



Mutual Synchronization of Spintronic Nano-Oscillator Ensembles

Ludmila A. Tsyrunnikova^{1,2✉}, Daniil A. Frolov¹, Ansar R. Safin^{1,2}

¹National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

²Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉ mila.tsyrunnikova@gmail.com

Abstract

Introduction. The use of spintronic components significantly enhances the performance, reduces the size, and lowers the power consumption of modern electronic devices. The spintronic oscillator (SO) is an integral part of spintronic devices. Connecting several SOs (> 100) into ensembles with subsequent synchronization mitigates such SO drawbacks as low output power and high phase noise. These drawbacks appear as a result of an increase in the output power of an SO ensemble compared to a single oscillator under a simultaneous decrease in the spectral linewidth of the ensemble.

Aim. To investigate the impact of connection topologies, synchronization mechanisms, and oscillator failures on the synchronization of oscillator ensembles.

Materials and methods. The Kuramoto phase model was used to simplify the numerical modeling of synchronization of SOs connected into an ensemble.

Results. A Kuramoto equation for phases of SOs connected in an ensemble was derived, and the influence of connection topologies and oscillator failures on the synchronization parameters of an ensemble of N connected oscillators was demonstrated.

Conclusion. In order to ensure the shortest transition time of an SO ensemble to the synchronous mode, topologies with a higher number of connections between oscillators (e.g., "all-to-all") are preferable. The results obtained confirm the advantages of local connection of an SO ensemble by a common current, thus forming an "all-to-all" topology. This makes the transition time of the SO ensemble to the synchronous mode less dependent on both oscillator failures and the number of synchronized SOs.

Keywords: spintronic oscillator, spintronic oscillator ensembles, synchronization, Kuramoto model, connection topology, oscillator failure, synchronization mechanisms

For citation: Tsyrunnikova L. A., Frolov D. A., Safin A. R. Mutual Synchronization of Spintronic Nano-Oscillator Ensembles. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 5, pp. 65–76. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-5-65-76

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The work was supported by the Russian Federation state assignment at the V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, RAS.

Submitted 26.08.2024; accepted 21.10.2024; published online 29.11.2024

Введение. Ужесточение требований к современным радиоэлектронным устройствам, таких, как миниатюризация, малое энергопотребление и быстроедействие, способствует активному внедрению радиоэлектронных элементов на базе спинтроники [1]. Перспективными элементами спинтронных структур являются спинтронные осцилляторы (СО), вызывающие интерес благодаря совокупности таких преимуществ, как миниатюрные размеры (десятки и сотни наномет-

ров), широкие возможности интеграции с существующей технологией КМОП [2], генерация СВЧ-колебаний с быстрой и широкополосной перестройкой током резонансной частоты [3, 4]. Перспективность СО подтверждается множеством работ по их возможным прикладным приложениям: магниторезистивная память на основе спинтронных вентилей [5], магнитные сенсоры и датчики [6], отдельные элементы системы фазовой синхронизации [7–9], нейро-

морфные сети и машины Изинга [10] и др. При этом недостатками СО, ограничивающими их практическое применение, являются малая выходная мощность единичного СО (примерно единицы нановатт) и большая ширина спектральной линии – единицы и десятки мегагерц на частотах в единицы гигагерц. Фазовая синхронизация многих взаимосвязанных СО (> 100) с последующим сложением мощностей осцилляторов в общей нагрузке позволяет увеличить выходную мощность, значительно уменьшить ширину спектральной линии ансамбля СО и уменьшить уровень фазового шума [11]. Взаимную синхронизацию ансамбля СО можно реализовать тремя механизмами связи: магнетодипольная связь [12], спин-волновая связь [13] и связь общим током [14, 15]. Показана как теоретическая [16], так и практическая [17] возможность получения большей выходной мощности ансамбля синхронизированных взаимосвязанных СО общим током через макроскопические контакты по сравнению с мощностью единичного осциллятора. В [18] продемонстрированы результаты по уменьшению ширины спектральной линии массива СО, связанных на наномасштабах одновременно магнетодипольной связью и связью общим током без существенного увеличения выходной мощности ансамбля СО. Когерентное сложение мощностей в общую нагрузку ансамбля синхронизированных СО, связанных спиновыми волнами, экспериментально продемонстрировано в [13]. Так, одно из ключевых направлений исследований взаимодействия СО в ансамбле – исследование влияния различных факторов на синхронизацию ансамбля. Немаловажным при объединении массива СО в ансамбли является выбор топологии связи осцилляторов. Ранее этот вопрос исследовался в ряде работ [19, 20], однако детально влияние топологии осцилляторов на быстродействие входа ансамбля СО в синхронный режим и на синхронизацию ансамбля при выходе из строя одного из осцилляторов не исследовалось.

Математическая модель. Рассмотрим математическую модель ансамбля N нелинейных взаимосвязанных СО в виде уравнений прецессии векторов намагниченности в комплексных амплитудах $c_{l,j}(t)$ [21]:

$$\frac{dc_l}{dt} + i\omega_{0,l}(|c_l|^2)c_l + \Gamma_{+,l}(|c_l|^2)c_l - \Gamma_{-,l}(|c_l|^2)c_l = \sum_j^N \Omega_{l,j} e^{i\beta_{l,j}} c_j, \quad (1)$$

где $\omega_{0,l}$ – собственная частота l -го осциллятора; $\Gamma_{+,l}(|c_l|^2)$ – слагаемое, характеризующее положительное нелинейное затухание; $\Gamma_{-,l}(|c_l|^2)$ – слагаемое, характеризующее отрицательные потери (эффект переноса спинового момента); $\Omega_{l,j}$ и $\beta_{l,j}$ – частотные и фазовые коэффициенты связи, описывающие взаимодействие между l -м и j -м осцилляторами, l и j меняются от 1 до N . Для анализа влияния топологии на время перехода в синхронный режим ограничимся рассмотрением динамики фаз взаимосвязанных осцилляторов, поэтому примем следующее допущение: амплитуды колебаний осцилляторов стационарны и равны. Данное приближение возможно при достаточно больших запасах по самовозбуждению [21]. С учетом $c_l = \sqrt{p_{0l}} e^{i\theta_l}$ и $p_{0l} = \text{const}$, где θ_l – фаза осциллятора, мнимая часть (1) примет вид

$$\dot{\theta}_l = \omega_{0,l} + \frac{1}{N} \sum_j^N \Omega_{i,j} \sin(\theta_j - \theta_l + \beta_{l,j}). \quad (2)$$

Здесь $\Omega_{i,j}$ – коэффициент связи между l -м и j -м осцилляторами, зависящий от физического механизма связи СО.

Полученная система дифференциальных уравнений при нулевом сдвиге разности фаз ($\beta_{i,j} = 0$) имеет вид классической модели фазовых осцилляторов Курамото [22], удобной для численного исследования синхронизации фазовых осцилляторов.

Для описания коллективной динамики ансамбля осцилляторов вводится комплексный параметр порядка [22]

$$r(t)e^{i\varphi(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j(t)},$$

где $r(t)$ характеризует когерентность фаз ансамбля СО; $\varphi(t)$ – среднее значение фаз. Мо-

доль параметра порядка изменяется в диапазоне $0 \leq r(t) \leq 1$, где $r(t) = 1$ обозначает полную синхронизацию ансамбля СО, а $r(t) = 0$ – асинхронную динамику осцилляторов.

На синхронизацию ансамбля СО влияют 3 физических механизма связи: магнетодипольная (MD) связь, спин-волновая (SW) связь и связь общим током (SPC), для каждой из которых можно найти коэффициент связи Ω . Коэффициент магнетодипольной связи имеет вид [23]

$$\Omega_{MD} = \frac{V_{ef}}{a^3} \frac{\omega_M^2}{\omega_g} f(H_0),$$

где V_{ef} – эффективный объем каждого осциллятора; a – расстояние между осцилляторами; $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$ (γ – гиромагнитное отношение; M_0 – намагниченность насыщения свободного слоя СО); ω_g – генерируемая частота; $f(H_0)$ – безразмерная функция порядка единицы, зависящая от амплитуды и ориентации внешнего магнитного поля.

Коэффициент спин-волновой связи рассчитывается как [23]

$$\Omega_{SW} \approx 0.65\Gamma_G \sqrt{\frac{R_c}{a}} \exp(-\Gamma_G a / v_{gr}),$$

где Γ_G – половина ширины линии ферромагнитного резонанса; R_c – радиус СО; v_{gr} – групповая скорость распространяющейся спиновой волны.

Коэффициент связи общим током имеет вид [24]

$$\Omega_{SPC} = \frac{\varepsilon g \mu_B}{2eM_0 d S} I Q_{SPC},$$

где ε – коэффициент спиновой поляризации; g – фактор Ланде; μ_B – магнетон Бора; e – заряд электрона; d – толщина свободного слоя СО; S – площадь свободного слоя СО; I – ток, протекающий через СО; Q_{SPC} – безразмерный коэффициент, характеризующий взаимодействие двух СО.

На рис. 1 представлены графики зависимостей коэффициентов магнетодипольной связи, спин-

волновой связи и связи общим током от расстояния между осцилляторами для следующих значений параметров: $V_{ef} = 12\,560 \cdot 10^{-9}$ нм; $\omega_g = 107.4$ ГГц; $\gamma = 1.76 \cdot 10^{11}$ Гц/Тл; $\mu_0 M_0 = 0.6$ Тл; $f(H_0) = 0.3$; $\Gamma_G = 10.7$ ГГц; $R_c = 20$ нм; $v_{gr} = 296.1$ м/с; $\varepsilon = 0.1$; $g = 2$; $\mu_B = 927.4 \times 10^{-26}$ Дж/Тл; $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $d = 5$ нм; $S = 3.14 \cdot 10^{-14}$ м²; $Q_{SPC} = 2.5$ при значениях тока $I_1 = 50$ мкА; $I_2 = 100$ мкА; $I_3 = 500$ мкА. Видно, что магнетодипольная связь и связь спиновыми волнами зависят от расстояния, т. е. являются локальными, в то время как связь общим током нелокальная и не изменяется при увеличении расстояния между СО. Магнетодипольная связь преобладает лишь на малых расстояниях между СО ($a < 150$ нм), на расстояниях от 150 нм доминирует спин-волновая связь. Так как связь общим током не зависит от расстояния, то ее использование предпочтительнее для больших расстояний между СО ($a > 600$ нм), а также этот механизм превалирует на меньших расстояниях между осцилляторами при увеличении силы тока, протекающего через СО. Таким образом, регулируя силу тока через СО можно добиваться увеличения (или уменьшения) значения константы связи, а значит, полосы взаимной синхронизации [21].

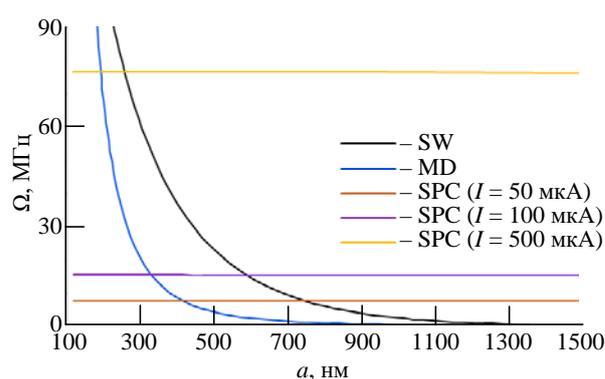


Рис. 1. Зависимость коэффициента связи Ω от расстояния a между СО для магнетодипольной связи (MD), спин-волновой (SW) и связи общим током (SPC) при трех значениях силы постоянного тока, протекающего через СО

Fig. 1. Dependence of the coupling coefficient Ω on the distance between the oscillators a connected by the common current (SPC), magneto-dipolar coupling (MD), and coupling through the radiation of propagating spin waves (SW)

Влияние топологии связи ансамбля на параметры синхронизации СО. Для исследования влияния различных топологий связи в (2) введем матрицу смежности A , характеризующую наличие или отсутствие связи между СО. Примем следующие допущения – СО идентичны, т. е. сила связи между осцилляторами $\Omega_{i,j}$ одинакова, при этом сдвиг разности фаз $\beta_{i,j} = 0$. Итоговая система дифференциальных уравнений для исследования влияния топологии связи на параметры синхронизации ансамбля СО имеет вид

$$\dot{\theta}_l = \omega_l + \frac{\Omega}{N} \sum_{j=1}^N A_{lj} \sin(\theta_j - \theta_l). \quad (3)$$

Рассмотрим 3 вида топологии связи: "линейка" (рис. 2, а), "кольцо" (рис. 2, б), "все со всеми" (рис. 2, в). Видно, что в зависимости от топологии меняется количество связей между СО: для "линейки" количество связей рассчитывается как $2N - 2$; для "кольца" – $2N$; для "все со всеми" – $N^2 - N$. Результаты численного интегрирования системы (3) – зависимости парамет-

ра порядка при $N = 10$ СО с коэффициентом связи $\Omega = 3$ МГц для топологий "линейка", "кольцо" и "все со всеми" приведены на рис. 2, з. Начальные фазы осцилляторов выбраны случайным образом так, чтобы для каждой топологии ансамбль СО вышел в синхронный режим.

Видно, что каждой топологии в переходном режиме ($r(t) < 1$) соответствует свой наклон зависимости параметра порядка от времени, т. е. скорость синхронизации СО. Быстродействие синхронизации СО характеризуется временем переходного процесса $t_{\text{синхр}}$, в течение которого происходит полная синхронизация ансамбля СО: $r(t_{\text{синхр}}) = 0.95r_{\text{max}} + 0.05r_{\text{min}}$. Топологии "все со всеми" соответствует самое быстрое (наименьшее время переходного процесса) установление синхронного состояния.

На время переходного процесса влияют следующие 4 фактора: количество связей между СО, т. е. топология связи; количество связанных СО N ; начальные условия по фазам СО θ_i ; коэффициент связи Ω . Влияние начальных условий СО состав-

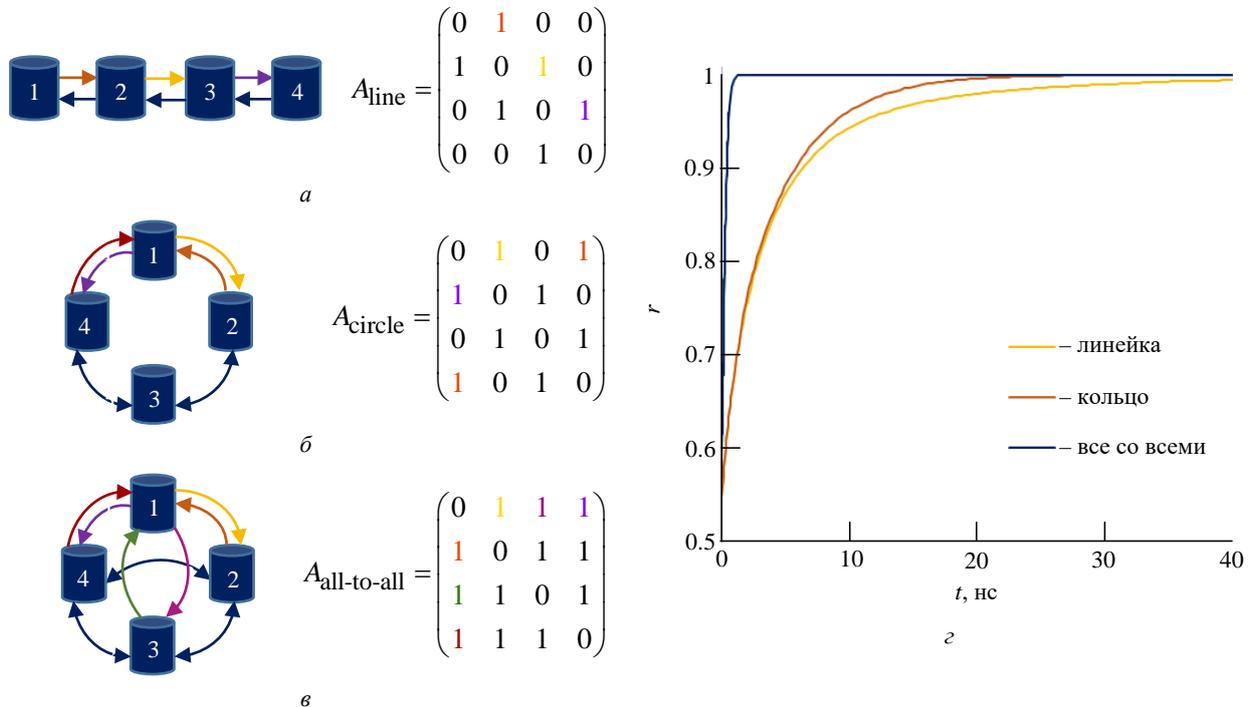


Рис. 2. Матрица смежности для $N = 4$ СО, связанных топологией "линейка" (а); "кольцо" (б); "все со всеми" (в).
 Зависимость параметра порядка от времени для $N = 10$ СО, связанных "линейкой" (line), "кольцом" (circle) и "все со всеми" (all-to-all) с коэффициентом связи $\Omega = 3$ МГц (з)

Fig. 2. Adjacency matrix for $N = 4$ SOs connected through "line" (a), "ring" (b), and "all-to-all" (c) topologies.
 Dependence of the order parameter on time for $N = 10$ SOs connected through "line", "ring", and "all-to-all" topologies with a coupling coefficient $\Omega = 3$ MHz (z)

ляет предмет отдельного детального исследования и здесь не рассматривается.

На рис. 3 представлены усредненные зависимости времени переходного процесса от коэффициента связи для трех топологий: "линейка", "кольцо" и "все со всеми". Каждому значению Ω соответствует 100 случайных начальных условий СО, причем из выборки исключались случаи срыва синхронизации. Видно, что время переходного процесса уменьшается с увеличением коэффициента связи, а также с ростом количества связей между СО при постоянном N .

На рис. 4 представлены усредненные зависимости времени переходного процесса от количества осцилляторов для трех топологий:

"линейка", "кольцо" и "все со всеми". Здесь также рассматривался ансамбль осцилляторов со случайными фазами. Время переходного процесса повышается с ростом N , так как увеличивается количество фаз осцилляторов, которые необходимо синхронизировать. При этом для топологии "все со всеми" увеличение времени $t_{\text{синхр}}$ менее ощутимо вследствие более резкого повышения количества связей между СО с ростом N , в сравнении с другими топологиями.

Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что для уменьшения времени перехода в синхронный режим при постоянном количестве осцилляторов необходимо

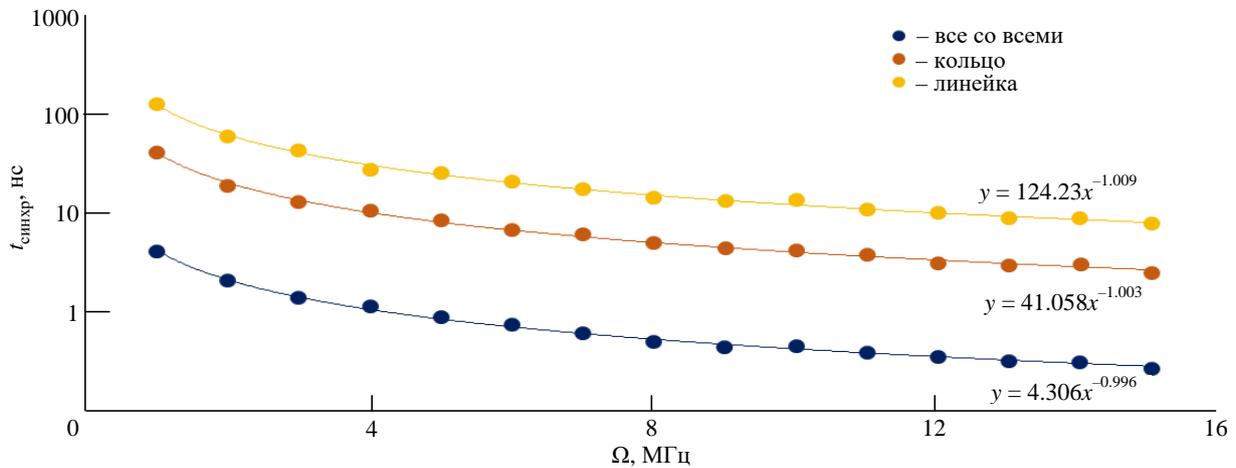


Рис. 3. Усредненные зависимости времени переходного процесса $t_{\text{синхр}}$ от коэффициента связи Ω для трех топологий ансамбля СО: "линейка", "кольцо", "все со всеми" для $N = 10$ СО с 100 случайными начальными фазами

Fig. 3. Averaged dependencies of the transition time t_{synchr} on the coupling coefficient Ω for three SO ensemble topologies: "line", "ring" and "all-to-all" for $N = 10$ SOs with 100 random initial phases

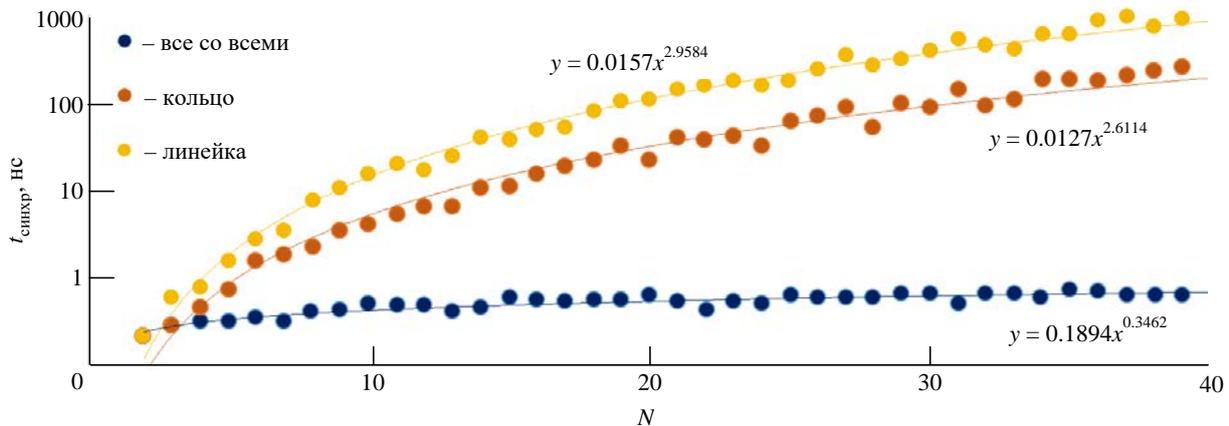


Рис. 4. Усредненные зависимости для 100 случайных начальных условий СО времени переходного процесса $t_{\text{синхр}}$ от количества СО N для трех топологий ансамбля СО: "линейка", "кольцо", "все со всеми" для $\Omega = 10$ МГц

Fig. 4. Averaged dependencies of the transition time t_{synchr} on the number of SOs N for three SO ensemble topologies: "line", "ring," and "all-to-all," with 100 random initial conditions for $\Omega = 10$ MHz

выбирать топологию с наибольшим числом связей, например "все со всеми", или комбинировать разные топологии, а также увеличивать коэффициент связи. При этом, чем выше количество связей в топологии, тем слабее меняется время $t_{\text{синхр}}$ с ростом количества взаимосвязанных СО в ансамбле.

Влияние отказа в работе СО на синхронизацию ансамбля. Помимо непрерывной динамики ансамбля осцилляторов важно также рассмотреть случаи выхода из строя элементов ансамбля. Для этого необходимо в момент выхода СО из строя изменить в (3) элемент матрицы смежности A , отвечающий за связь данного осциллятора с другими. Рассмотрим частный случай выхода из строя одного СО в топологии "кольцо". При этом коэффициент связи станет таким же, как и для топологии "линейка". Для моделирования возьмем 10 СО, связанных топологией "кольцо" с коэффициентом связи $\Omega = 3$ МГц, и считаем, что в момент времени $t_{\text{err}} = 5$ нс откажет один из осцилляторов. Иллюстрация геометрии задачи и зависимость параметра порядка от времени для топологий "линейка", "кольцо",

"все со всеми", а также для "кольца", в котором отказывает один из СО, представлены на рис. 5.

Видно, что при $t < t_{\text{err}}$ осцилляторы в ансамбле "кольцо с отказом" синхронизируются так же, как и в "кольце", а при $t > t_{\text{err}}$ синхронизация замедляется, так как у "линейки" время переходного процесса больше, чем у "кольца".

Рассмотрим вариант отказа осциллятора в топологии с наибольшим количеством связей между СО. Для моделирования синхронизируются 10 СО в ансамбле, связанных топологией "все со всеми" с коэффициентом связи $\Omega = 3$ МГц, и в момент времени $t_{\text{err}} = 0.5$ нс отказывает один из СО. Сравним этот случай с непрерывной работой ансамбля СО при тех же условиях (рис. 6). Видно, что зависимости слабо расходятся и время переходного процесса отличается менее чем на 0.1 нс.

Таким образом, для нивелирования влияния отказов на общую работу ансамбля СО следует увеличивать количество связей между осцилляторами, например используя топологию "все со всеми" или введя дополнительные связи между осцилляторами.

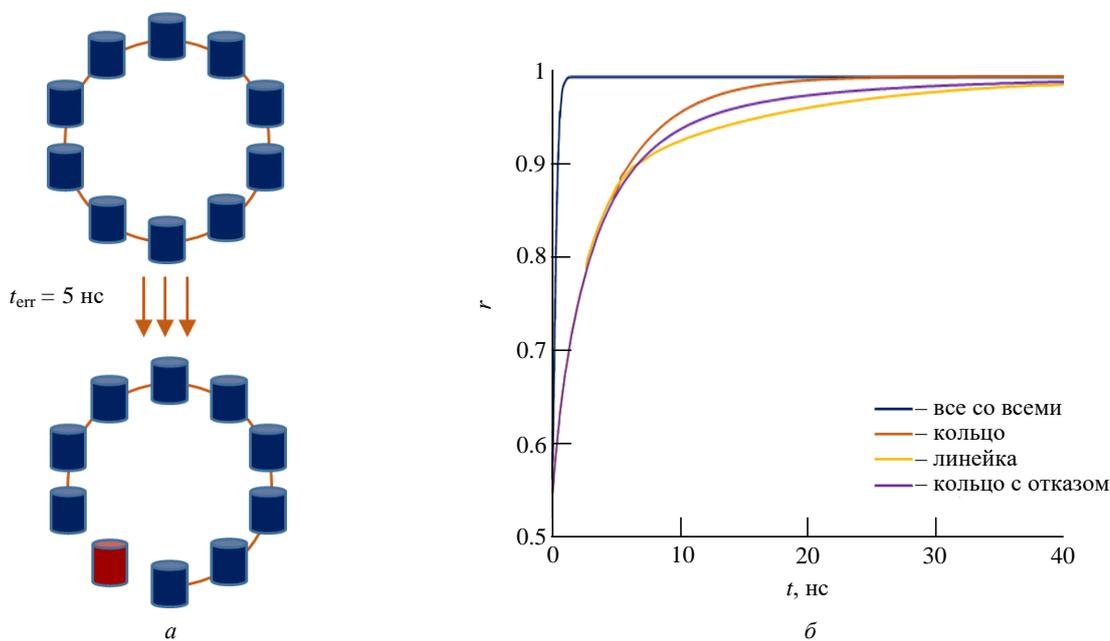


Рис. 5. Иллюстрация геометрии задачи при выходе из строя в момент времени $t_{\text{err}} = 5$ нс одного из 10 СО, соединенных в топологии "кольцо" (а). Зависимость параметра порядка от времени для топологий "линейка", "кольцо", "все со всеми" и для топологии "кольцо" с отказом одного из СО в момент времени $t_{\text{err}} = 5$ нс (б)

Fig. 5. The geometry of the problem when one of 10 SOs connected through the "ring" topology fails at time $t_{\text{err}} = 5$ ns (a). Dependence of the order parameter on time for the "line," "ring," "all-to-all" topologies, and the "ring" topology with one SO failure at $t_{\text{err}} = 5$ ns (b)

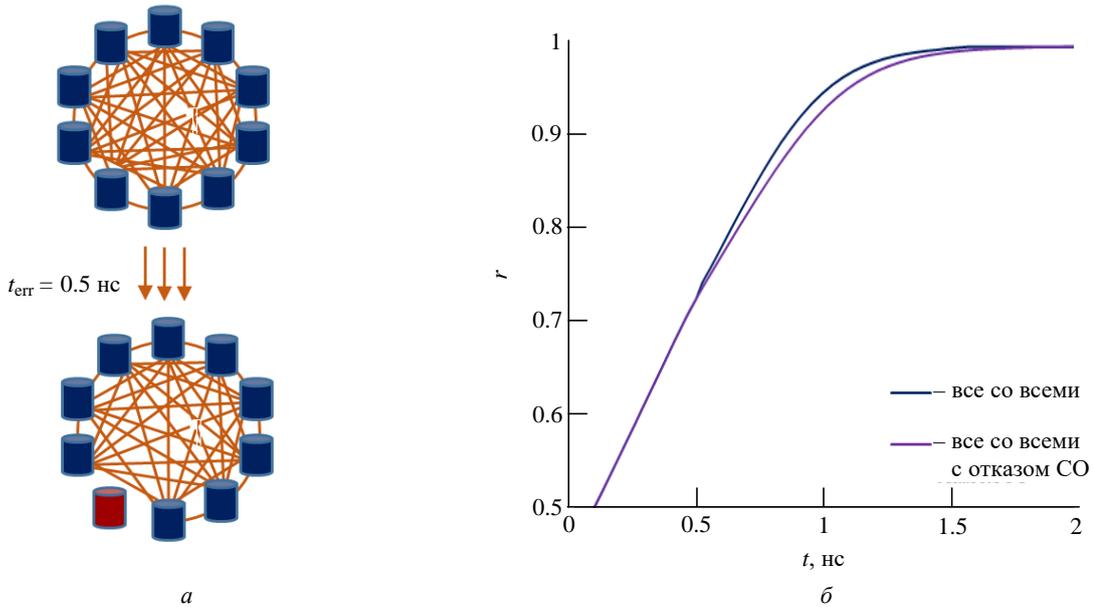


Рис. 6. Иллюстрация геометрии задачи при выходе из строя в момент времени $t_{err} = 5 \text{ нс}$ одного из 10 СО, соединенных в топологии "все со всеми" (а). Зависимость параметра порядка от времени для топологии "все со всеми" с непрерывной работой СО в ансамбле и для топологии "все со всеми" с отказом одного из СО в момент времени $t_{err} = 0.5 \text{ нс}$ (б)

Fig. 6. The geometry of the problem when one of 10 SOs connected through the "all-to-all" topology fails at time $t_{err} = 5 \text{ ns}$ (a). Dependence of the order parameter on time for the "all-to-all" topology with continuous operation of SOs in the ensemble and for the "all-to-all" topology with one SO failure at $t_{err} = 0.5 \text{ ns}$ (b)

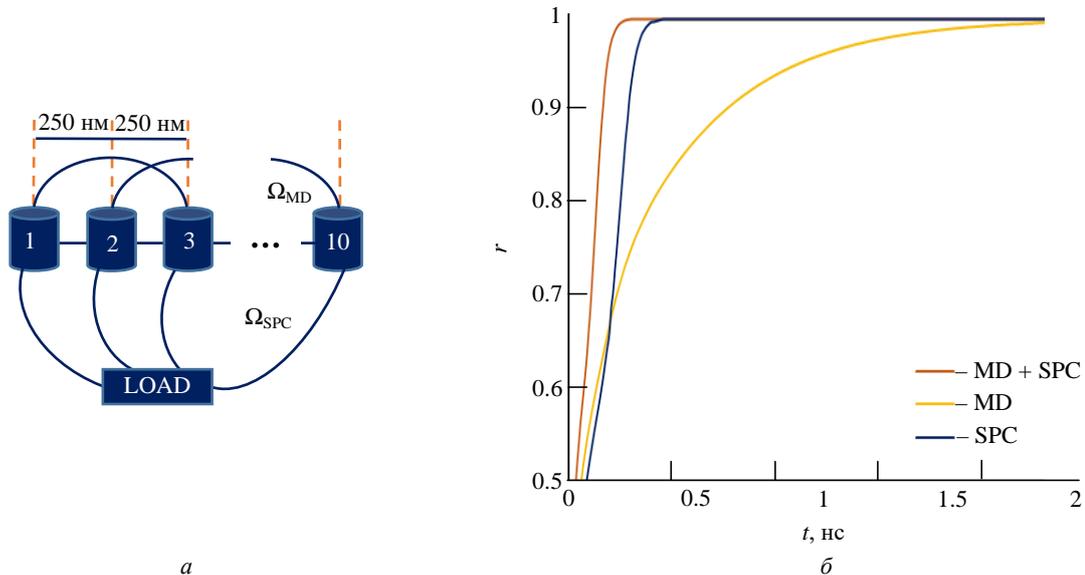


Рис. 7. Иллюстрация геометрии задачи (а). Зависимость параметра порядка от времени для 10 СО с комбинированной связью MD + SPC, с MD и с SPC (б)

Fig. 7. The geometry of the problem (a). Dependence of the order parameter on time for 10 SOs with combined MD + SPC coupling, with MD and SPC coupling types (b)

Влияние механизмов связи на синхронизацию СО. Рассмотрим ансамбль из $N = 10$ осцилляторов, связанных магнетодипольной связью с топологией "линейка". В качестве одного из способов увеличения мощности ансамбля СО в N раз, по сравнению с мощностью еди-

ничного СО, будем складывать выходную мощность каждого СО ансамбля в общую нагрузку. Так возникает еще одна связь всех СО между собой через общий ток по топологии "все со всеми" (рис. 7, а). Тогда уравнение (3) преобразуется к следующему виду:

$$\dot{\theta}_l = \omega_l + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Omega_{MD} j \sin(\theta_j - \theta_l) + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Omega_{SPC} j \sin(\theta_j - \theta_l),$$

где Ω_{MD} и Ω_{SPC} – коэффициенты магнетодипольной связи и связи общим током соответственно. Пусть расстояние между соседними осцилляторами составляет 250 нм. Тогда коэффициент магнетодипольной связи для двух соседних осцилляторов на рис. 2 будет $\Omega = 33$ МГц, а через один СО – $\Omega = 5$ МГц, так как магнетодипольная связь уменьшается с увеличением расстояния между СО. Для больших расстояний (> 750 нм) магнетодипольная связь будет слишком мала, поэтому связью через 2 и более СО можно пренебречь. При этом связь общим током не зависит от расстояния и для силы тока в 50 мкА равна 8 МГц.

Зависимость параметра порядка от времени ансамбля 10 СО с двумя механизмами связи, а также с магнетодипольной связью 10 СО по топологии "линейка" (MD) и отдельно со связью общим током по топологии "все со всеми" (SPC) с коэффициентами связи Ω_{MD} и Ω_{SPC} соответ-

ственно показана на рис. 7, б. Видно, что синхронизация для комбинированной связи (магнетодипольная связь + связь общим током (MD + SPC)) наступает раньше, чем для одиночного механизма связи. Интересно, что для топологии "все со всеми" с коэффициентом связи $\Omega = 8$ МГц синхронизация СО наступает раньше, чем для топологии "линейка" с коэффициентом связи $\Omega = 33$ МГц для соседних и $\Omega = 5$ МГц через один СО. Для снижения времени переходного процесса синхронизации СО необходимо уменьшать расстояние между СО для локальной связи и использовать топологии с большим числом связей между осцилляторами, например, располагать СО в виде решетки, а не линейки, а также комбинировать механизмы связи ансамбля СО.

Рассмотрим отказ в работе осциллятора ансамбля СО с комбинированной связью. Пусть в рассмотренной ранее модели откажет один осциллятор (рис. 8, а) в момент времени $t_{err} = 1$ нс. Из рис. 8 видно, что в случае отказа одного из осцилляторов (MD + SPC с отказом) синхронизация произойдет позднее, чем для случая безотказной работы ансамбля. При этом время переходного процесса у ансамбля с отказом СО все еще меньше, чем у ансамбля СО с одиночной связью.

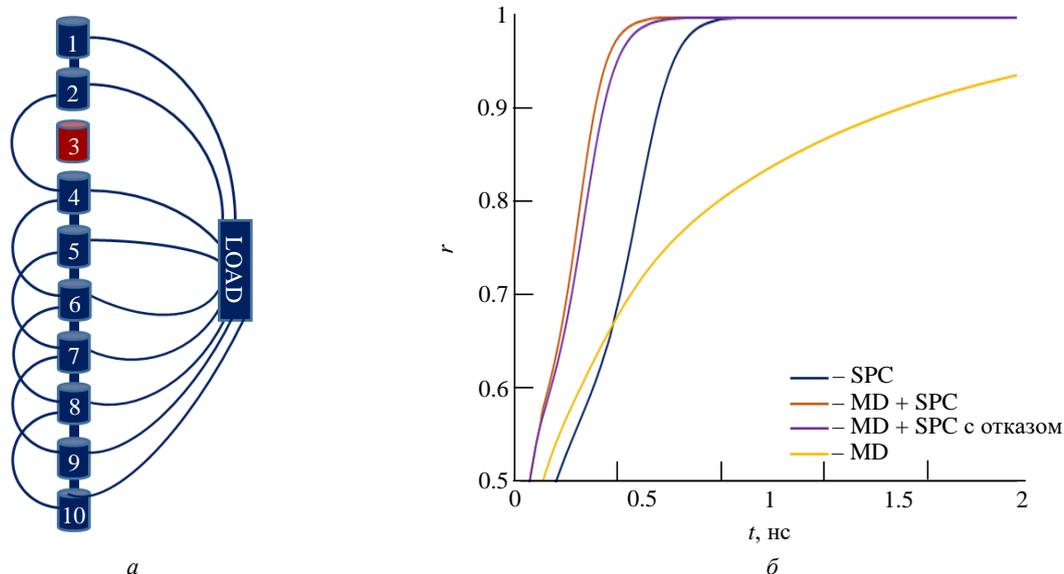


Рис. 8. Иллюстрация геометрии задачи ансамбля СО с комбинированной связью с отказом одного из осцилляторов в момент времени $t_{err} = 1$ нс (а). Зависимость параметра порядка от времени для ансамбля СО с комбинированной связью MD + SPC, с MD + SPC с отказом, а также для MD и SPC (б)

Fig. 8. The geometry of the problem for an SOs ensemble with combined coupling, with one oscillator failing at $t_{err} = 1$ ns (a). Dependence of the order parameter on time for an SOs ensemble with combined (MD + SPC) coupling, MD + SPC with failure, as well as for MD and SPC coupling types (b)

Заключение. Использование локальной связи ансамбля СО с малым расстоянием ($a < 500$ нм) между осцилляторами позволяет получить высокие значения коэффициентов связи Ω , что в свою очередь влияет на быстродействие синхронизации: с увеличением коэффициента связи уменьшается время переходного процесса. Однако именно связь общим током, имеющая сравнительно низкие значения коэффициента связи между осцилляторами, обеспечивает оптимальную топологию связи СО "все со всеми" с наибольшим числом связей между осцилляторами и постоянное значение

коэффициента связи в независимости от расстояния между СО. Это в свою очередь обеспечивает высокое быстродействие перехода в синхронный режим ансамбля СО, по сравнению с другими топологиями ансамблей СО, и уменьшает влияние отказа в работе осциллятора на $t_{\text{синхр}}$. Связь общим током позволяет синхронизировать большое количество СО в ансамбле без существенного увеличения времени переходного процесса, и ее предпочтительнее использовать для синхронизации больших ансамблей в устройствах спинтроники.

Список литературы

1. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178, № 12. С. 1336–1348. doi: 10.3367/UFNr.0178.200812f.1336
2. CMOS compatible W/CoFeB/MgO spin Hall nano-oscillators with wide frequency tunability / M. Zahedinejad, H. Mazraati, H. Fulara, J. Yue, S. Jiang, A. Awad, J. Åkerman // Applied Physics Let. 2018. Vol. 112, № 13. P. 132404. doi: 10.1063/1.5020260
3. Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current / S. I. Kiselev, J. C. Sankey, I. N. Krivorotov, N. C. Emley, R. J. Schoelkopf, R. A. Buhrman, D. C. Ralph // Nature. 2003. Vol. 425, № 6956. P. 380–383. doi: 10.1038/nature01967
4. Ralph D. C., Stiles M. D. Spin transfer torques // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2008. Vol. 320, № 7. P. 1190–1216. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.12.019
5. Magnetoresistive random access memory / J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, R. Meservey // Physical Review Let. 1995. Vol. 74, № 16. P. 3273–3276.
6. Sensitivity and Noise of a Magnetic Field Sensor Based on Magnetostatic Spin Wave YIG Device and Its Integrated Electronics / O. Haas, B. Dufay, S. Saez, C. Dolabdjian // IEEE Sensors J. 2020. Vol. 20, № 23. P. 14289–14296. doi: 10.1109/JSEN.2020.3008555
7. Митрофанов А. А., Сафин А. Р., Удалов Н. Н. Система фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора // Письма в журн. техн. физики. 2014. Т. 40, вып. 13. С. 66–72.
8. Theory of spin torque nano-oscillator-based phase-locked loop / A. A. Mitrofanov, A. R. Safin, N. N. Udalov, M. V. Kapranov // J. of Applied Physics. 2017. Vol. 122, № 12. P. 123903. doi: 10.1063/1.4997160
9. Mitrofanov A., Safin A., Udalov N. Phase Locked Loop of the Spin-Torque Nanooscillator // Technical Physics Let. 2014. Vol. 40. P. 571–573. doi: 10.1134/S1063785014070074
10. Spintronic devices as next-generation computation accelerators / V. H. González, A. Litvinenko, A. Kumar, R. Khymyn, J. Åkerman // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2024. Vol. 28, № 1. Art. № 101173. doi: 10.1016/j.cossms.2024.101173
11. Two-dimensional mutually synchronized spin Hall nano-oscillator arrays for neuromorphic computing / M. Zahedinejad, A. A. Awad, S. Muralidhar, R. Khymyn, H. Fulara, H. Mazraati, M. Dvornik, J. Åkerman // Nature Nanotechnology. 2020. Vol. 15, № 1. P. 47–52. doi: 10.1038/s41565-019-0593-9
12. Phase locking dynamics of dipolarly coupled vortex-based spin transfer oscillators / A. D. Belanovsky, N. Locatelli, P. N. Skirdkov, F. Abreu Araujo, J. Grollier, K. A. Zvezdin, V. Cros, A. K. Zvezdin // Physical Review B. 2012. Vol. 85, № 10. P. 100409. doi: 10.1103/PhysRevB.85.100409
13. Mutual phase-locking of microwave spin torque nano-oscillators / S. Kaka, M. R. Pufall, W. H. Rippard, T. J. Silva, S. E. Russek, J. A. Katine // Nature. 2005. Vol. 437, № 7057. P. 389–392. doi: 10.1038/nature04035
14. Grollier J., Cros V., Fert A. Synchronization of spin-transfer oscillators driven by stimulated microwave currents // Physical Review B. 2006. Vol. 73, № 6. P. 060409. doi: 10.1103/PhysRevB.73.060409
15. Taniguchi T. Synchronization of Spin Torque Oscillators through Spin Hall Magnetoresistance // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. Vol. 53, № 11. P. 1–7. Art. № 3400907. doi: 10.1109/TMAG.2017.2704588
16. Impact of the electrical connection of spin transfer nano-oscillators on their synchronization: an analytical study / B. Georges, J. Grollier, V. Cros, A. Fert, A. V. Khvalkovskiy, K. A. Zvezdin // Applied Physics Let. 2008. Vol. 92, № 23. P. 232504. doi: 10.1063/1.2945636
17. Electrically connected spin-torque oscillators array for 2.4 GHz WiFi band transmission and energy harvesting / R. Sharma, R. Mishra, T. Ngo, Y. X. Guo, S. Fukami, H. Sato, H. Ohno, H. Yang // Nature Communications. 2021. Vol. 12, № 1. Art. № 2924. doi: 10.1038/s41467-021-23181-1
18. Two-dimensional mutual synchronization in spin Hall nano-oscillator arrays / M. Zahedinejad, A. A. Awad, S. Muralidhar, R. Khymyn, H. Fulara, H. Mazraati, M. Dvornik, J. Åkerman // Nature Nanotechnology. 2020. Vol. 15, № 1. P. 47–52. doi: 10.1038/s41565-019-0593-9
19. Synchronization in complex networks / A. Arenas, A. Díaz-Guilera, J. Kurths, Y. Moreno, C. Zhou // Physics

Reports. 2008. Vol. 469, № 3. P. 93–153. doi: 10.1016/j.physrep.2008.09.002

20. Coletta T., Delabays R., Jacquod P. Finite-size scaling in the Kuramoto model // *Physical Review E*. 2017. Vol. 95, № 4. P. 042207. doi: 10.1103/PhysRevE.95.042207

21. Slavin A., Tiberkevich V. Excitation of Spin Waves by Spin-Polarized Current in Magnetic Nano-Structures // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. Vol. 44. P. 1916–1927. doi: 10.1109/TMAG.2008.924537

22. Kuramoto Y. Self-Entrainment of a Population of Coupled Nonlinear Oscillators. Intern. Symp. on Mathemati-

cal Problems in Theoretical Physics // *Lecture Notes in Physics*. 1975. Vol. 39. P. 420–422. doi: 10.1007/BFb0013365

23. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009. Vol. 45, № 4. P. 1875–1918. doi: 10.1109/TMAG.2008.2009935

24. Tsyrlnikova L. A., Safin A. R. Mutually synchronized spin Hall nano-oscillators by a common current // *Proc. of the Samarkand Intern. Symp. on Magnetism, Samarkand, Uzbekistan, 2–6 July 2023*. P. 57.

Информация об авторах

Цырульникова Людмила Александровна – инженер по специальности "Радиотехника" (2020, НИУ "МЭИ"), ассистент кафедры формирования и обработки радиосигналов указанного университета, инженер ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов: радиотехника; спинтроника; система фазовой синхронизации; синхронизация.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия
E-mail: mila.tsyrlnikova@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-0385-8029>

Фролов Даниил Андреевич – кандидат технических наук (2021), доцент Национального исследовательского университета "МЭИ". Автор 14 научных публикаций. Сфера научных интересов: автогенераторы; бигармонические автогенераторы; генераторы шума; синхронизация автогенераторов.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МЭИ", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия
E-mail: FrolovDanA@mpei.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7171-6028>

Сафин Ансар Ризаевич – доктор физико-математических наук (2023), доцент, заместитель директора по научной работе ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, руководитель лаборатории, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов Национального исследовательского университета "МЭИ". Глава отдела в ООО "Радиокомп". Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика и электроника; радиотехника; физика магнитных явлений; спинтроника.

Адрес: Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ул. Моховая, д.11, к.7, Москва, 125009, Россия
E-mail: arsafin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>

References

1. Fert A. Origin, Development, and Prospects of Spintronics. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2008, vol. 178, no. 12, pp. 1336–1348. doi: 10.3367/UFN.0178.200812f.1336

2. Zahedinejad M., Mazraati H., Fulara H., Yue J., Jiang S., Awad A., Åkerman J. CMOS Compatible W/CoFeB/MgO Spin Hall Nano-Oscillators with Wide Frequency Tunability. *Applied Physics Lett*. 2018, vol. 112, no. 13, p. 132404. doi: 10.1063/1.5020260

3. Kiselev S. I., Sankey J. C., Krivorotov I. N., Emley N. C., Schoelkopf R. J., Buhrman R. A., Ralph D. C. Microwave Oscillations of a Nanomagnet Driven by a Spin-Polarized Current. *Nature*. 2003, vol. 425, no. 6956, pp. 380–383. doi: 10.1038/nature01967

4. Ralph D. C., Stiles M. D. Spin Transfer Torques. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008, vol. 320, no. 7, pp. 1190–1216. doi: 10.1016/j.jmmm.2007.12.019

5. Moodera J. S., Kinder L. R., Wong T. M., Meservey R. Magnetoresistive Random Access Memory. *Physical Review Lett*. 1995, vol. 74, no. 16, pp. 3273–3276.

6. Haas O., Dufay B., Saez S., Dolabdjian C. Sensitiv-

ity and Noise of a Magnetic Field Sensor Based on Magnetostatic Spin Wave YIG Device and Its Integrated Electronics. *IEEE Sensors J*. 2020, vol. 20, no. 23, pp. 14289–14296. doi: 10.1109/JSEN.2020.3008555

7. Mitrofanov A. A., Safin A. R., Udalov N. N. Phase Synchronization System of a Spin-Transfer Nano-Oscillator. *Technical Physics Lett*. 2014, vol. 40, iss. 13, pp. 66–72. (In Russ.)

8. Mitrofanov A. A., Safin A. R., Udalov N. N., Kapranov M. V. Theory of Spin Torque Nano-Oscillator-Based Phase-Locked Loop. *J. of Applied Physics*. 2017, vol. 122, no. 12, p. 123903. doi: 10.1063/1.4997160

9. Mitrofanov A., Safin A., Udalov N. Phase Locked Loop of the Spin-Torque Nanooscillator. *Technical Physics Lett*. 2014, vol. 40, pp. 571–573. doi: 10.1134/S1063785014070074

10. González V. H., Litvinenko A., Kumar, Khymyn A. R., Åkerman J. Spintronic Devices as Next-Generation Computation Accelerators. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2024, vol. 28, no. 1, art. no. 101173. doi: 10.1016/j.cossms.2024.101173

11. Zahedinejad M., Awad A. A., Muralidhar S., Khymyn R., Fulara H., Mazraati H., Dvornik M., Åkerman J. Two-Dimensional Mutually Synchronized Spin Hall Nano-Oscillator Arrays for Neuromorphic Computing. *Nature Nanotechnology*. 2020, vol. 15, no. 1, pp. 47–52. doi: 10.1038/s41565-019-0593-9
12. Belanovsky A. D., Locatelli N., Skirdkov P. N., Abreu Araujo F., Grollier J., Zvezdin K. A., Cros V., Zvezdin A. K. Phase Locking Dynamics of Dipolarly Coupled Vortex-Based Spin Transfer Oscillators. *Physical Review B*. 2012, vol. 85, no. 10, p. 100409. doi: 10.1103/PhysRevB.85.100409
13. Kaka S., Pufall M. R., Rippard W. H., Silva T. J., Russek S. E., Katine J. A. Mutual Phase-Locking of Microwave Spin Torque Nano-Oscillators. *Nature*. 2005, vol. 437, no. 7057, pp. 389–392. doi: 10.1038/nature04035
14. Grollier J., Cros V., Fert A. Synchronization of Spin-Transfer Oscillators Driven by Stimulated Microwave Currents. *Physical Review B*. 2006, vol. 73, no. 6, p. 060409. doi: 10.1103/PhysRevB.73.060409
15. Taniguchi T. Synchronization of Spin Torque Oscillators through Spin Hall Magnetoresistance. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017, vol. 53, no. 11, pp. 1–7, art. no. 3400907. doi: 10.1109/TMAG.2017.2704588
16. Georges B., Grollier J., Cros V., Fert A., Khvalkovskiy A. V., Zvezdin K. A. Impact of the Electrical Connection of Spin Transfer Nano-Oscillators on Their Synchronization: an Analytical Study. *Applied Physics Lett*. 2008, vol. 92, no. 23, p. 232504. doi: 10.1063/1.2945636
17. Sharma R., Mishra R., Ngo T., Guo Y. X., Fukami S., Sato H., Ohno H., Yang H. Electrically Connected Spin-Torque Oscillators Array for 2.4 GHz WiFi Band Transmission and Energy Harvesting. *Nature Communications*. 2021, vol. 12, no. 1, art. no. 2924. doi: 10.1038/s41467-021-23181-1
18. Zahedinejad M., Awad A. A., Muralidhar S., Khymyn R., Fulara H., Mazraati H., Dvornik M., Åkerman J. Two-Dimensional Mutual Synchronization in Spin Hall Nano-Oscillator Arrays. *Nature Nanotechnology*. 2020, vol. 15, no. 1, pp. 47–52. doi: 10.1038/s41565-019-0593-9
19. Arenas A., Díaz-Guilera A., Kurths J., Moreno Y., Zhou C. Synchronization in Complex Networks. *Physics Reports*. 2008, vol. 469, no. 3, pp. 93–153. doi: 10.1016/j.physrep.2008.09.002
20. Coletta T., Delabays R., Jacquod P. Finite-Size Scaling in the Kuramoto Model. *Physical Review E*. 2017, vol. 95, no. 4, p. 042207. doi: 10.1103/PhysRevE.95.042207
21. Slavin A., Tiberkevich V. Excitation of Spin Waves by Spin-Polarized Current in Magnetic Nano-Structures. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008, vol. 44, pp. 1916–1927. doi: 10.1109/TMAG.2008.924537
22. Kuramoto Y. Self-Entrainment of a Population of Coupled Nonlinear Oscillators. *Intern. Symp. on Mathematical Problems in Theoretical Physics. Lecture Notes in Physics*. 1975, vol. 39, pp. 420–422. doi: 10.1007/BFb0013365
23. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009, vol. 45, no. 4, pp. 1875–1918. doi: 10.1109/TMAG.2008.2009935
24. Tsyrlnikova L. A., Safin A. R. Mutually Synchronized Spin Hall Nano-Oscillators by a Common Current. *Proc. of the Samarkand Intern. Symp. on Magnetism, Samarkand, Uzbekistan, 2–6 July 2023*. P. 57.

Information about the authors

Ludmila A. Tsyrlnikova, engineer in "Radio Engineering" (2020, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"), assistant at the Department of Radio Signal Formation and Processing of the named university, engineer of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: radio engineering; spintronics; phase-locked loop; synchronization. Address: National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia
E-mail: mila.tsyrlnikova@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-0385-8029>

Daniil A. Frolov, Cand. Sci. (Eng.) (2021), Associate Professor of National Research University "Moscow Power Engineering Institute". The author of 14 scientific publications. . Area of expertise: auto-generators; bi-harmonic auto-generators; noise generators; auto-generator synchronization. Address: National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia
Email: FrolovDanA@mpei.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7171-6028>

Ansar R. Safin, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2023), Associate Professor, Deputy Director for Research of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Radio Signal Generation and Processing of National Research University "Moscow Power Engineering Institute". Head of the Department of Radiocomp LLC. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: radiophysics and electronics; radio engineering; physics of magnetic phenomena; spintronics. Address: Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 11, Mokhovaya St., Moscow 125009, Russia
E-mail: arsafin@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6507-6573>