

**Статья публикуется в порядке дискуссии**

УДК 621.318.1;537.611.4

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-166-171

**Спектральный анализ сигналов с использованием спин-трансферного наноосциллятора в режиме синхронизации**

А.Р. Сафин, А.А. Митрофанов, Н.Н. Удалов, М.В. Капранов

Исследован спектральный анализ сигналов с использованием спин-трансферного наноосциллятора в режиме внешней фазовой синхронизации. Работа мотивирована исследованиями в области спинтроники, спин-трансферных наноосцилляторов (СТНО), нейроморфных вычислений.

В настоящее время ведутся активные исследования по созданию миниатюрных источников колебаний в диапазоне сверхвысоких частот. Одними из перспективных кандидатов на эту роль являются СТНО, обладающие размерами в десятки и сотни нанометров и перестраиваемые в диапазоне от долей до десятков гигагерц. Основным недостатком таких генераторов — низкая выходная мощность генерируемых колебаний, достигающая сотен нановатт.

Одним из способов повышения мощности устройств на базе СТНО является объединение их в ансамбли с целью синхронизации и сложения мощностей. Известны различные механизмы внешней и взаимной синхронизации СТНО, например, с помощью схем фазовой автоподстройки частоты. Несмотря на большое количество работ в области синхронизации СТНО, многие задачи до сих пор не решены. Предложено использовать СТНО как детектор СВЧ-сигналов, работающий в режиме фазовой синхронизации. Это позволило бы сконструировать спектроанализатор, функционирующий при малых мощностях входного (анализируемого) сигнала (вплоть до единиц пиковатт).

Проведено компьютерное моделирование основных режимов работы данного анализатора и найдены основные рабочие характеристики (предельная чувствительность и максимальная скорость сканирования). Исследована математическая модель синтезатора на базе СТНО и методами теории колебаний аналитически определены его основные рабочие характеристики, сравнимые с аналогичными, полученными численными методами. Полученные результаты могут использоваться при экспериментальном исследовании анализаторов спектра на базе СТНО и различных устройств спинтроники.

*Ключевые слова:* спин-трансферный наноосциллятор, взаимная синхронизация, спектральный анализ.

*Для цитирования:* Сафин А.Р., Митрофанов А.А., Удалов Н.Н., Капранов М.В. Спектральный анализ сигналов с использованием спин-трансферного наноосциллятора в режиме синхронизации // Вестник МЭИ. 2018. № 5. С. 166—171. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-166-171.

**Spectral Analysis of Signals Using a Spin-Transfer Nanooscillator in the Phase-Locking Regime**

A.R. Safin, A.A. Mitrofanov, N.N. Udalov, M.V. Kapranov

The spectral analysis of signals with the use of a spin-transfer nanooscillator operating in the external phase-locking regime is investigated. The study is motivated by investigations carried out in the field of spintronics, spin-transfer nanooscillators (STNO) and neuromorphic computing. Currently, active research is underway on developing miniature oscillation sources in the microwave band. STNOs, which have dimensions of tens and hundreds of nanometers and retuned in the range of fractions to tens of gigahertz are among the promising candidates for this role. The main disadvantage of such generators is the low output power of generated oscillations, making a few hundred nanowatt.

One possible way to increase the power of STNO-based devices is to combine them into ensembles in order to synchronize and add their capacities. Various mechanisms of external and mutual synchronization of STNO are known, for example, by means of phase-locked circuits. Despite a large number of works in the field of STNO synchronization, many problems have not been solved as yet. It is proposed to use an STNO as a detector of microwave signals operating in the phase locking regime. This would make it possible to construct a spectrum analyzer operating at low power of the input (analyzed) signal (as low as a few picowatt).

The main operating modes of this analyzer have been numerically simulated, and its main operating characteristics (the limiting sensitivity and maximum scanning rate) have been determined. The mathematical model of an STNO-based synthesizing device has been investigated, and its main performance characteristics have analytically been determined using the oscillation theory methods, which have been compared with the similar parameters obtained using numerical methods. The obtained results can be used in experimental investigations of STNO-based spectrum analyzers and various spintronic devices.

*Key words:* spin-transfer nanooscillator, mutual synchronization, spectral analysis.

*For citation:* Safin A.R., Mitrofanov A.A., Udalov N.N., Kapranov M.V. Spectral Analysis of Signals Using a Spin-Transfer Nanooscillator in the Phase-Locking Regime. MPEI Vestnik. 2018;5:166—171. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-166-171.

## Введение

В настоящее время ведутся активные исследования по созданию миниатюрных источников колебаний в диапазоне сверхвысоких частот. Перспективными кандидатами на эту роль являются спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО), обладающие размерами в десятки и сотни нанометров и перестраиваемые в диапазоне от долей до десятков гигагерц [1]. Основным недостатком данных генераторов является низкая выходная мощность генерируемых колебаний, достигающая сотен нановатт. Один из способов повышения мощности устройств на базе СТНО — объединение их в ансамбли с целью синхронизации и сложения мощностей [2, 3]. Известны различные механизмы внешней и взаимной синхронизации СТНО [3 — 9], но, несмотря на большое количество работ в этой области, многие задачи до сих пор не решены.

Предложено использовать СТНО как детектор СВЧ-сигналов, работающий в режиме фазовой синхронизации [8]. Это позволило бы сконструировать спектроанализатор, функционирующий при малых мощностях входного (анализируемого) сигнала (вплоть до единиц пиковатт). Было проведено компьютерное моделирование основных режимов работы анализатора и найдены основные рабочие характеристики (предельная чувствительность и максимальная скорость сканирования). В работе [8] исследована математическая модель синтезатора на базе СТНО и методами теории колебаний аналитически найдены его основные рабочие характеристики, которые сравнивали с аналогичными, полученными в [8]. Представленные в настоящей работе результаты могут использоваться при экспериментальном исследовании анализаторов спектра на базе СТНО и различных устройств спинтроники [9 — 20].

## Структурная схема спектроанализатора на базе спин-трансферных наноосцилляторов

Структурная схема спектроанализатора на основе СТНО показана на рис. 1. Принцип работы ее следующий. Входной для СТНО ток состоит из двух составляющих  $i_{вх} = i_a + i_y$ , где  $i_a$  — ток, спектр которого необходимо проанализировать;  $i_y$  — пилообразный ток, используемый для управления частотой. Спектроана-

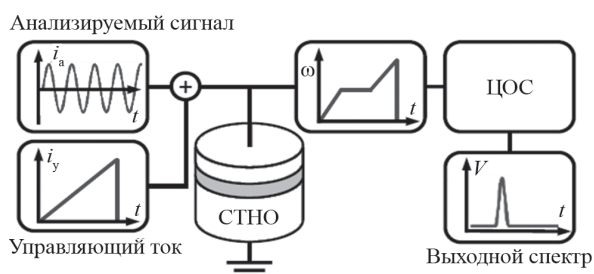


Рис. 1. Структурная схема спектроанализатора на основе СТНО [8]

лизатор является генератором напряжения, управляемым и перестраиваемым по частоте током. По мере увеличения тока  $i_y$  со временем частота колебаний СТНО также будет меняться [9] и, когда частота колебаний анализируемого сигнала  $i_a$  попадет в полосу синхронизма осциллятора, произойдет захват частоты его колебаний. Блок цепи обработки сигнала (ЦОС) сравнивает частоты СТНО и входного сигнала  $i_a$  и формирует сигнал  $v$ , пропорциональный разности фаз синхронизируемых колебаний и равный нулю вне полосы синхронизма. Таким образом, спектроанализатор на основе СТНО работает в режимах фазовой и частотной синхронизации к внешнему анализируемому сигналу, а по сигналу  $v$  оценивается спектр во временной области  $\tau_c$ , соответствующей полосе синхронизма. Выходное напряжение  $v$  определяется путем усреднения  $v = \langle i_a r_{СТНО} \rangle$ , где  $r_{СТНО}$  — мгновенное значение сопротивления СТНО [8].

## Математическая модель спектроанализатора

Математической моделью спектроанализатора на основе СТНО является уравнение для комплексной амплитуды  $c(t)$  по первой гармонике спиновой волны, распространяющейся в свободном слое, вида

$$\frac{dc}{dt} + i(\omega_0 + N|c|^2)c + \Gamma_G(1 + Q|c|^2)c - \sigma i_y(1 - |c|^2)c = \Lambda e^{-i(\omega_{вх}t + \varphi_{вх})}. \quad (1)$$

Здесь  $\omega_0 = |\gamma|(B_{ext} - \mu_0 M_s)$  — частота ферромагнитного резонанса;  $B_{ext}$  — величина внешнего поля подмагничивания,  $B_{ext} = 1,5$  Тл;  $\mu_0 M_s$  — намагниченность насыщения ферромагнетика,  $\mu_0 M_s = 0,8$  Тл;  $\gamma$  — гиромагнитное отношение,  $\gamma = -1,76 \cdot 10^{11}$  Гц/Тл;  $N$  — коэффициент неизохронности,  $N = 2|\gamma|\mu_0 M_s$ ;  $\Gamma_G = \alpha_G \omega_0$ ,  $\alpha_G = 0,01$  — константа затухания Гильберта;  $Q = 2\omega_M/\omega_0$ ;  $\omega_M = |\gamma|\mu_0 M_s$ ;  $\sigma$  — константа спиновой поляризации,  $\text{рад}/(c \cdot \text{А})$ ;  $\Lambda = -\sigma \tan \theta I_a / 2\sqrt{2}$ ,  $I_a$  — амплитуда анализируемого сигнала;  $\theta = 30^\circ$  — угол спиновой поляризации;  $\omega_{вх}$ ,  $\varphi_{вх}$  — частота и начальная фаза анализируемого сигнала.

Настоящая модель при отсутствии внешнего сигнала  $I_a = 0$  и постоянном управляющем токе  $i_y = I_0 = \text{const}$  (условие 1) подробно описана в [1, 9]. Приведем основные результаты.

Стационарное решение уравнения (1) при условии  $1 c_0 = \sqrt{p_0} e^{-i\omega_{st}t}$ , где

$$p_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} |c(t)|^2 = \frac{\zeta - 1}{\zeta + Q}; \quad (2)$$

$$\omega_{st} = \omega_0 + N \frac{\zeta - 1}{\zeta + Q}, \quad (3)$$

где  $\zeta = II_{кр}$  — фактор самовозбуждения;  $I_{кр}$  — критический ток, при котором возникают колебания в СТНО.

Мгновенное значение мощности спиновой волны  $p(t) = |c(t)|^2$  можно найти из (1) путем интегрирования

$$p(t) = |c(t)|^2 = \frac{P_0}{1 - \left(1 - \frac{P_0}{P_{нач}}\right) e^{-2\Delta\Gamma t}}, \quad (4)$$

где  $\Delta\Gamma = \Gamma_G(\zeta - 1)$ ;  $p_{нач}$  — начальное условие по мощности.

Как видно, решение (4) имеет стандартный для автогенераторов экспоненциальный характер установления [10 — 13].

**Спин-трансферные наноосцилляторы при пилообразном входном токе**

Рассмотрим работу СТНО при пилообразном входном токе (рис. 2, а) без учета гармонического входного воздействия. Аналитически ток управления  $i_y$  запишем в следующем виде:

$$I = I_0 + \varepsilon(t - T_1)[1(t - T_1) - 1(t - T_2)], \quad (5)$$

где  $T_1, T_2$  — времена начала и окончания действия пилообразного тока,  $T_1 = 100$  нс,  $T_2 = 600$  нс;  $1(t)$  — функция Хэвисайда;  $\varepsilon = \Delta I / \Delta T$  — крутизна пилообразного сигнала, А/с;  $\Delta I = I_{max} - I_0 = 1,2$  мА — интервал изменения тока;  $\Delta T = T_2 - T_1 = 500$  нс — длительность пилообразного импульса.

Найдем решение (1) с учетом (5) при  $\Lambda = 0$  в виде  $c(t) = U(t)e^{-i\varphi(t)}$ , получим систему из трех уравнений для амплитуды  $U(t)$ , фазы  $\varphi(t)$  и параметра  $\xi = \varepsilon(t - T_1) / I_0$

$$\begin{cases} dU/d(\Gamma_G t) = (\zeta - 1)U - (\zeta + Q)U^3 + \zeta\xi U[1 - U^2] \\ d\xi/d(\Gamma_G t) = \varepsilon / (I_0 \Gamma_G); \\ d\varphi/d(\Gamma_G t) = \omega_0 / \Gamma_G + (N / \Gamma_G)U^2. \end{cases} \quad (6)$$

В данном случае переменная  $\xi$  меняется на отрезке  $[\xi_{min}, \xi_{max}]$ , где  $\xi_{min} = \varepsilon T_1 / I_0 = 0,08$ ,  $\xi_{max} = \varepsilon T_2 / I_0 = 0,48$ .

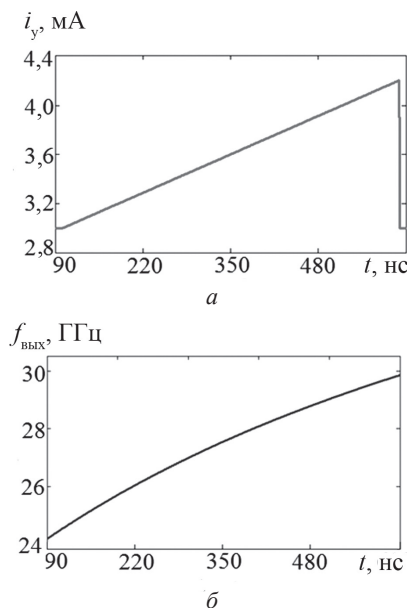


Рис. 2. Осциллограмма управляющего тока  $i_y(t)$  (а) и зависимость частоты колебаний СТНО  $f_{вых}$  от времени  $t$

Динамику системы (6) анализируем на этом отрезке времени. Поскольку в первое уравнение (6) не входит фаза  $\varphi(t)$ , то изучаем динамику амплитуды  $U$  при изменении переменной  $\xi$  на фазовой плоскости  $(U, \xi)$ . Соответствующий график показан на рис. 3, откуда следует, что с ростом переменной  $\xi$  со временем (по мере увеличения управляющего тока) растет амплитуда СТНО  $U$ . Стационарную мощность  $p_0(\xi) = U_0^2(\xi)$  и частоту  $\omega_{СТНО}(\xi)$  колебаний СТНО, как функции переменной  $\xi$ , найдем из первого и третьего уравнений системы (6)

$$p_0(\xi) = \frac{\zeta(1 + \xi) - 1}{\zeta(1 + \xi) + Q}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \omega_{СТНО}(\xi) &= \omega_0 + N \frac{\zeta(1 + \xi) - 1}{\zeta(1 + \xi) + Q} \approx \omega_0 + \\ &+ N \frac{\zeta - 1}{\zeta + Q} + N \frac{\zeta\xi}{\zeta + Q}. \end{aligned} \quad (8)$$

График зависимости частоты колебаний  $\omega_{СТНО}$  от времени, исходя из (8), изображен на рис. 2, б. Диапазон перестройки по частоте  $\Delta\omega = \omega_{СТНО}(\xi_{max}) - \omega_{СТНО}(\xi_{min})$  при выбранных числовых параметрах соответствует  $\Delta\omega / 2\pi = 6,64$  ГГц. Выведем аналитически формулу для скорости сканирования  $R = d\omega_{СТНО} / dt$  из (8):

$$R = d\omega_{st} / dt = \frac{N\zeta}{\zeta + Q} \frac{\varepsilon}{I_0}. \quad (9)$$

При выбранных физических параметрах  $R / 2\pi \approx 22$  МГц/нс, что по порядку величин совпадает со скоростью сканирования [8]. Как следует из (9), скорость сканирования прямо пропорциональна параметру неизохронности  $N$  и может увеличиваться при росте  $N$ .

Перейдем к исследованию рабочих характеристик спектроанализатора при наличии входного гармонического тока, т. е. при  $\Lambda \neq 0$ .

**Рабочие характеристики спектроанализатора**

Перепишем уравнение (1) для комплексной амплитуды  $c(t)$  в виде системы уравнений для действительной амплитуды  $U(t)$  и разности фаз  $\psi = \omega_{вх} t + \varphi_{вх} - \varphi$ :

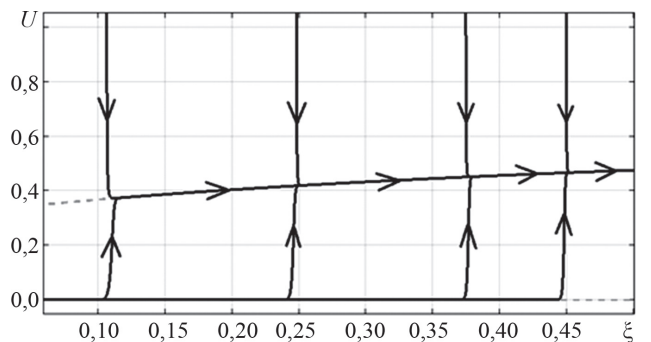


Рис. 3. Фазовый портрет СТНО при пилообразном входном токе

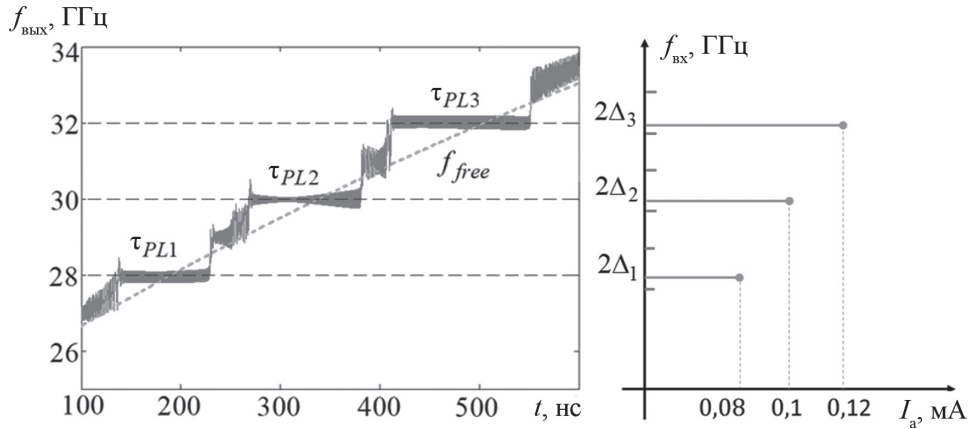


Рис. 4. Зависимость частоты колебаний СТНО  $f_{\text{вых}}$  от времени  $t$ ; интервал с постоянной частотой соответствует режиму синхронизации

$$\begin{cases} dU/d(\Gamma_G t) = (\zeta - 1)U - (\zeta + Q)U^3 + \\ + \zeta \xi U [1 - U^2] + (\Lambda/\Gamma_G) \cos \psi; \\ d\xi/d(\Gamma_G t) = \varepsilon/(I_0 \Gamma_G); \\ d\psi/d(\Gamma_G t) = \Delta\omega/\Gamma_G - \\ - (N/\Gamma_G)U^2 + (\Lambda/[U\Gamma_G]) \sin \psi, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\Delta\omega = \omega_{\text{вх}} - \omega_0$  — разность частот двух сигналов.

Для различения двух сигналов с различными частотами необходимо, чтобы интервалы синхронизации, соответствующие разным спектральным составляющим, не перекрывались. Зависимость частоты колебаний СТНО  $f_{\text{вых}}$  от времени  $t$  показана на рис. 4 для разных амплитуд входного сигнала  $I_a$ .

Интервал с постоянной частотой соответствует режиму синхронизации. Найдем интервал синхронизации  $\tau_{PL}$  с помощью фазового уравнения системы (10). Для вывода приближенных аналитических выражений примем, что амплитуда внешнего воздействия невелика, стационарная мощность  $p_0(\xi)$  меняется в соответствии с (7), а стационарную разность фаз  $\psi_0 = \text{const}$  можно найти из третьего уравнения (10), приравняв правую часть нулю. Времени входа в синхронный режим  $t = t_1$  соответствует граничное значение полосы синхронизма, при котором  $\sin \psi = -1$ , а времени выхода  $t = t_2$  —  $\sin \psi = 1$ , тогда из третьего уравнения системы (10) получим:

$$\Delta\omega - Np_0(\xi_i) \mp \Lambda/\sqrt{p_0(\xi_i)} = 0, \quad (11)$$

где  $\xi_i = \varepsilon(t_i - T_1)/I_0$ ;  $i = 1, 2$ ; знаки  $m$  соответствуют временам  $t_{1,2}$ .

Разложим  $p_0(\xi_i)$  и  $1/\sqrt{p_0(\xi_i)}$  в ряд Тейлора по малому параметру  $\xi_i$

$$\begin{aligned} p_0(\xi_i) &\approx \frac{\zeta - 1}{\zeta + Q} \left( 1 + \frac{\zeta}{\zeta - 1} \xi_i \right); \\ \frac{1}{\sqrt{p_0(\xi_i)}} &\approx \sqrt{\frac{\zeta + Q}{\zeta - 1}} \left( 1 - \frac{\zeta}{2(\zeta - 1)} \xi_i \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Интервал синхронизма  $\tau_{PL} = t_2 - t_1$  найдем из (11), (12)

$$\tau_{PL} = \frac{|\Lambda|}{\sqrt{p_0}} \frac{(3Np_0 - \Delta\omega) I_0 (\zeta - 1)}{N^2 p_0^2 - \Lambda^2/4p_0} \frac{1}{\varepsilon \zeta}, \quad (13)$$

где  $p_0 = p_0(0)$  вычислим по (7).

При условиях  $N \gg \Lambda$ ,  $N \gg \Delta\omega$  формулу (13) приближенно можно переписать в виде

$$\tau_{PL} \approx \frac{3|\Lambda|}{\sqrt{p_0} R}. \quad (14)$$

Из (14) следует, что длительность интервала синхронизации (полоса синхронизма) прямо пропорциональна нормированной амплитуде входного тока  $|\Lambda| \sim I_{jf}$  и обратно пропорциональна скорости сканирования  $R$ . Зависимости интервала синхронизации от амплитуды входного тока для разных скоростей сканирования даны на рис. 5. Исходя из (13), можно найти максимально возможную скорость сканирования  $R_{\text{max}}$  с заданным интервалом синхронизации  $\tau_{PL}$ , при котором не происходит наложения интервалов синхронизации от соседних спектральных составляющих. Величины интервала синхронизации (десятки наносекунд) из (13), (14) по порядку величин совпадают с аналогичными из [8].

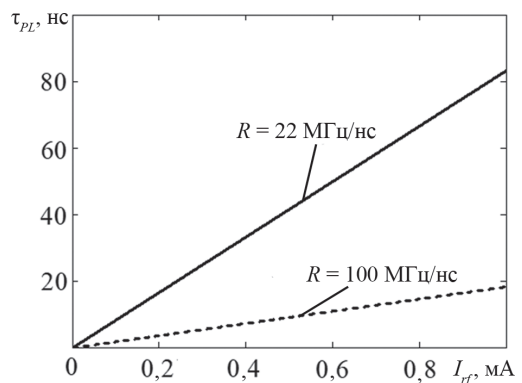


Рис. 5. Зависимости интервала синхронизации  $\tau_{PL}$  от амплитуды входного тока  $I_{jf}$  для разных скоростей сканирования  $R$

## Заключение

Исследована математическая модель спектроанализатора, выполненного на основе эффекта внешней фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора. С помощью анализа укороченных уравнений для амплитуды и разности фаз получено аналитическое выражение для вычисления длительности интервала синхронизации  $\tau_{PL}$ , которая прямо пропорциональна нормированной амплитуде входного тока  $|A| \sim I_{rf}$  и обратно пропорциональна скорости сканирования  $R$ .

Работа выполнена при поддержке базовой части Государственного задания РФ № 8.8109.2017/БЧ.

## Литература

1. **Slavin A., Tiberkevich V.** Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current // *IEEE Trans. Mag.* 2009. V. 45. Pp. 1875—1918.
2. **Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V.** Mutual Phase Locking of Very Nonidentical Spin Torque Nanooscillators via Spin Wave Interaction // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2014. V. 67. P. 20601.
3. **Сафин А.Р., Митрофанов А.А., Удалов Н.Н., Капранов М.В.** Синхронизация спин-трансферных наноосцилляторов // *Вестник МЭИ.* 2015. № 1. С. 96—100.
4. **Mitrofanov A.A., Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V.** Theory of Spin-torque Nano-oscillator-based Phase-locked Loop // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 122 P. 123903.
5. **Prokopenko O.V. e. a.** Spin-torque Microwave Detectors. Springer, 2013. Pp. 143—161.
6. **Kreissig M. e. a.** Vortex Spin-torque Oscillator Stabilized by Phase Locked Loop Using Integrated Circuits // *AIP Advances.* 2017. V. 7. P. 056653.
7. **Awad A. e. a.** Long-range Mutual Synchronization of Spin Hall Nano-oscillators // *Nat. Phys.* 2016. V. 14. Pp. 1—9.
8. **Louis S. e. a.** Low Power Microwave Signal Detection with a Spin-torque Nano-oscillator in the Active Self-oscillating Regime // *Trans. on Magn. Intermag.* 2017. Pp. 1—5.
9. **Сафин А.Р., Удалов Н.Н., Бичурин М.И., Петров Р.В., Татаренко А.С.** Нагрузочные характеристики спин-трансферного наноосциллятора // *Письма в ЖТФ.* 2017. № 6. С. 56—63.
10. **Дворников А.А., Уткин Г.М.** Автогенераторы в радиотехнике. М.: Радио и связь, 1991.
11. **Tamaru S. e. a.** // Measurement of Shot Noise in Magnetic Tunnel Junction and its Utilization for Accurate System Calibration // *Journ. of Appl. Phys.* 2017. V. 122. P. 193901.
12. **Lebrun R. e. a.** Nonlinear Behavior and Mode Coupling in Spin-transfer Nano-oscillators // *Phys. Rev. Appl.* 2014. V. 6. P. 061001.
13. **Lebrun R. e. a.** Mutual Synchronization of Spin Torque Nanooscillators Through a Long-range and

Tunable Electrical Coupling Scheme // *Nat. Comm.* 2017. V. 8. P. 15825.

14. **Sharma A.A., Bain J.A., Weldon J.A.** Phase Coupling and Control of Oxide-based Oscillators for Neuromorphic Computing // *IEEE J. Exploratory Solid-state Computational Devices and Circuits.* 2015. V. 1. Pp. 58—66.

15. **Mizrahi A. e. a.** Magnetic Stochastic Oscillators: Noise-induced Synchronization to Underthreshold Excitation and Comprehensive Compact Model // *IEEE Trans. Magnetics.* 2015. V. 51. Pp. 1—4.

16. **Rippard W., Pufall M., Kos A.** Time Required to Injection-lock Spin Torque Nanoscale Oscillators // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 103. P. 182403.

17. **Kumar D. e. a.** Coherent Microwave Generation by Spintronic Feedback Oscillator // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 30747.

18. **Tamaru S., Kubota H., Yakushiji K., Yuasa S., Fukushima A.** Extremely Coherent Microwave Emission from Spin Torque Oscillator Stabilized by Phase Locked Loop // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. P. 18134.

19. **Dixit D., Konishi K., Tomy C.V., Suzuki Y., Tulapurkar A.A.** Spintronic Oscillator Based on Magnetic Field Feedback // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. P. 122410.

20. **Choi H.S. e. a.** // Spin Nano-oscillator Based Wireless Communication // *Sci. Rep.* 2014. V. 4. P. 5486.

## References

1. **Slavin A., Tiberkevich V.** Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current. *IEEE Trans. Mag.* 2009;45:1875—1918.
2. **Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V.** Mutual Phase Locking of Very Nonidentical Spin Torque Nanooscillators via Spin Wave Interaction. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2014;67:20601.
3. **Safin A.R., Mitrofanov A.A., Udalov N.N., Kapranov M.V.** Синхронизация спин-трансферных наноосцилляторов. *Vestnik MPEI.* 2015;1:96—100. (in Russian).
4. **Mitrofanov A.A., Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V.** Theory of Spin-torque Nano-oscillator-based Phase-locked Loop. *J. Appl. Phys.* 2017;122:123903.
5. **Prokopenko O.V. e. a.** Spin-torque Microwave Detectors. Springer, 2013:143—161.
6. **Kreissig M. e. a.** Vortex Spin-torque Oscillator Stabilized by Phase Locked Loop Using Integrated Circuits. *AIP Advances.* 2017;7:056653.
7. **Awad A. e. a.** Long-range Mutual Synchronization of Spin Hall Nano-oscillators. *Nat. Phys.* 2016;14:1—9.
8. **Louis S. e. a.** Low Power Microwave Signal Detection with a Spin-torque Nano-oscillator in the Active Self-oscillating Regime. *Trans. on Magn. Intermag.* 2017:1—5.
9. **Safin A.R., Udalov N.N., Bichurin M.I., Petrov R.V., Tatarenko A.S.** Нагрузочные характеристики спин-трансферного наноосциллятора. *Pis'ma v ZHTF.* 2017; 6:56—63. (in Russian).

10. **Dvornikov A.A., Utkin G.M.** Avtogeneratory v Radiotekhnike. M.: Radio i Svyaz', 1991. (in Russian).
11. **Tamaru S. e. a.** Measurement of Shot Noise in Magnetic Tunnel Junction and its Utilization for Accurate System Calibration. Journ. of Appl. Phys. 2017;122:193901.
12. **Lebrun R. e. a.** Nonlinear Behavior and Mode Coupling in Spin-transfer Nano-oscillators. Phys. Rev. Appl. 2014;6:061001.
13. **Lebrun R. e. a.** Mutual Synchronization of Spin Torque Nanooscillators Through a Long-range and Tunable Electrical Coupling Scheme. Nat. Comm. 2017;8:15825.
14. **Sharma A.A., Bain J.A., Weldon J.A.** Phase Coupling and Control of Oxide-based Oscillators for Neuromorphic Computing. IEEE J. Exploratory Solid-state Computational Devices and Circuits. 2015;1:58—66.
15. **Mizrahi A. e. a.** Magnetic Stochastic Oscillators: Noise-induced Synchronization to Underthreshold Excitation and Comprehensive Compact Model. IEEE Trans. Magnetics. 2015;51:1—4.
16. **Rippard W., Pufall M., Kos A.** Time Required to Injection-lock Spin Torque Nanoscale Oscillators. Appl. Phys. Lett. 2013;103:182403.
17. **Kumar D. e. a.** Coherent Microwave Generation by Spintronic Feedback Oscillator. Sci. Rep. 2016;6:30747.
18. **Tamaru S., Kubota H., Yakushiji K., Yuasa S., Fukushima A.** Extremely Coherent Microwave Emission from Spin Torque Oscillator Stabilized by Phase Locked Loop. Sci. Rep. 2015;5:18134.
19. **Dixit D., Konishi K., Tomy C.V., Suzuki Y., Tulapurkar A.A.** Spintronic Oscillator Based on Magnetic Field Feedback. Appl. Phys. Lett. 2012;101:122410.
20. **Choi H.S. e. a.** Spin Nano-oscillator Based Wireless Communication. Sci. Rep. 2014;4:5486.

---

### Сведения об авторах

---

**Сафин Ансар Ризаевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: arsaafin@gmail.com  
**Митрофанов Александр Александрович** — аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: mitrofanov\_alexander@mail.ru  
**Удалов Николай Николаевич** — доктор технических наук, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: udalovnn@rambler.ru  
**Капранов Михаил Владимирович** — кандидат технических наук, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: kapranovmv@mail.ru

---

### Information about authors

---

**Safin Ansar R.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: arsaafin@gmail.com  
**Mitrofanov Aleksandr A.** — Ph.D.-student of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: mitrofanov\_alexander@mail.ru  
**Udalov Nikolay N.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: udalovnn@rambler.ru  
**Kapranov Mikhail V.** — Ph.D. (Techn.), Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: kapranovmv@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 16.03.2018*