

СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ МНОГИХ СПИНТРОННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

А.Р.Сафин, А.С.Татаренко*

POWER COMBINING OF MANY SPINTRONIC OSCILLATORS

A.R.Safin, A.S.Tatarenko*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва***Институт электронных и информационных систем НовГУ, Alexandr.Tatarenko@novsu.ru*

Исследован широкий класс автоколебательных систем сложения мощностей многих спинтронных осцилляторов с произвольной топологией объединения в ансамбли. Связь между осцилляторами рассмотрена с учетом макроспинового однодоменного приближения, при котором каждый осциллятор описывается своим уравнением Ландау—Лифшица—Гильберта—Слончевского. Исследованы стационарные режимы, свободные колебания, синхронизация и вопросы сложения мощностей. Построена нагрузочная характеристика ансамблей спинтронных осцилляторов с различной топологией. Показано, что иерархический ансамбль предпочтительнее для использования, так как от него можно получить большую мощность в нагрузке при одних и тех же параметрах и КПД цепи связи.

Ключевые слова: *спинтронные осцилляторы, сложение мощностей, синхронизация*

A wide class of self-oscillatory power combining systems of many spintronic oscillators with an arbitrary topology of network is studied. The coupling between oscillators is considered taking into account the macrospin single-domain approximation, in which each oscillator is described by its Landau—Lifshitz—Gilbert—Slonchewsky equation. The stationary states, free oscillations, synchronization and power combining issues were investigated. The load characteristics of the networks of spintronic oscillators with different topologies are constructed. It is shown that a hierarchical ensemble is preferable for use, since it can be used to obtain more power in the load with the same parameters and efficiency of the communication circuit.

Keywords: *spintronic oscillators, power combining, synchronization*

Введение

Важным направлением развития современной спин-транспортной электроники является построение стабильных, миниатюрных источников (осцилляторов) СВЧ и ТГц колебаний [1,2]. Были предложены две базовые конструкции спинтронных осцилляторов: так называемые спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО) и спин-холловские наноосцилляторы (СХНО), основанные на эффекте переноса спинового момента в первом случае из ферромагнетика с закрепленной намагниченностью, а во втором, благодаря спиновому эффекту Холла, из слоя тяжелого металла с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Далее будем называть СТНО и СХНО спинтронными осцилляторами (СО).

Основным недостатком СО является низкая выходная мощность генерируемых колебаний (от долей пиковатт до сотен микроватт) и большая ширина спектральной линии (десятки мегагерц на частоте в единицы гигагерц). Естественным решением улучшения этих характеристик является синхронизация СО и сложение их мощностей в общей нагрузке. Ранее предлагались различные способы синхронизации СО в зависимости от конструкции. Наиболее перспективными считаются способы связи общим током [3,4] и спиновыми волнами [5]. В настоящее время наилучшими экспериментальными результатами по синхронизации является синхронизация девяти СО типа СХНО общим током [6,7].

Ранее нагрузочные характеристики единичного СО изучались в [8]. Было показано, что существует оптимальное значение сопротивления нагрузки, обес-

печивающее максимум отдаваемой мощности. Применительно к ансамблям такой подход развивался в [9,10]. Было показано, что отказы в работе нескольких элементов в ансамбле могут приводить к выходу из строя всего ансамбля (выхода из режима самовозбуждения) в силу сильной взаимной связи через общую нагрузку.

Вопросы уменьшения ширины спектральной линии за счет применения схемы фазовой автоподстройки частоты изучались теоретически в [11] и экспериментально в [12,13]. Отметим также работу [14], в которой СО работал как спектроанализатор в режиме внешней прямой синхронизации. Негативное свойство СО — низкая выходная мощность — в данном случае использовалось как положительное. Минимально возможная чувствительность к входной мощности определялась мощностью СО (десятки пиковатт).

Теория сложения мощностей многих радиотехнических автогенераторов систематически развивалась в работах А.А.Дворникова и Г.М.Уткина в [15–18] (см. подробнее обзор работ в этой области до 1990 г. в монографии [19]). Соответствующая теория применялась для сложения мощностей транзисторных и ламповых автогенераторов, генераторов на диодах Ганна и лавинно-пролетных диодах, квантовых генераторов, а также распределенных RC-автогенераторов.

Сложение мощностей многих связанных спинтронных осцилляторов исследовано в литературе недостаточно полно. Сложность методов анализа единичных осцилляторов позволила относительно полно исследовать только вопросы синхронизации малых

ансамблей осцилляторов (двух, трех). Однако в настоящее время привлекает внимание синхронизация больших сетей осцилляторов, в том числе в связи с перспективами реализации нейроморфных процессоров [20].

Целью данной работы является исследование режимов работы ансамблей спинтронных осцилляторов в общем виде (стационарные режимы, синхронизация) с произвольной топологией объединения в ансамбли и применения теории сложения мощностей радиотехнических автогенераторов [19] с учетом специфики спинтроники, в частности существенной неизохронности спинтронных осцилляторов и невозможности реализовать согласующие элементы произвольного вида (микрополосковые линии связи для транзисторных СВЧ автогенераторов).

Математическая модель

Общая блок-схема N взаимосвязанных СО представлена на рис.1. Здесь связь между осцилляторами может осуществляться за счет различных механизмов: общим током, магнитодипольным взаимодействием или спиновыми волнами. Будем рассматривать макроспиновое однодоменное приближение, при котором каждый осциллятор описывается своим уравнением Ландау—Лифшица—Гильберта—Слончевского [2] (ЛЛГС) для вектора намагниченности $\mathbf{M}_i(t)$. Каждый СО как автогенератор описывается своим распределением токов и напряжений. Будем описывать их векторами $\mathbf{i}=(i_1, \dots, i_N)$ и $\mathbf{u}=(u_1, \dots, u_N)$. Связь между ними дается матрицей проводимости связей $\hat{y}=[y_{ij}]$, зависящей от типа связи и свойств СО. Будем считать, что проводимости y_{ij} являются операторами $p \equiv d/dt$ и связь между $\mathbf{i}$ и $\mathbf{u}$ дается операторным уравнением $\mathbf{i}(t) = \hat{y}(p)\mathbf{u}(t)$. Переходя от векторной записи к покомпонентной приходим к выражению следующего вида:

$$u_j = \frac{1}{\det \hat{y}} \sum_{k=1}^N \mathfrak{Z}_{kj}(p) i_k, \quad (1)$$

где $\mathfrak{Z}_{kj}(p)$ — оператор алгебраического дополнения элемента y_{kj} матрицы $\hat{y}$ и $\det \hat{y}$ — детерминант матрицы $\hat{y}$.

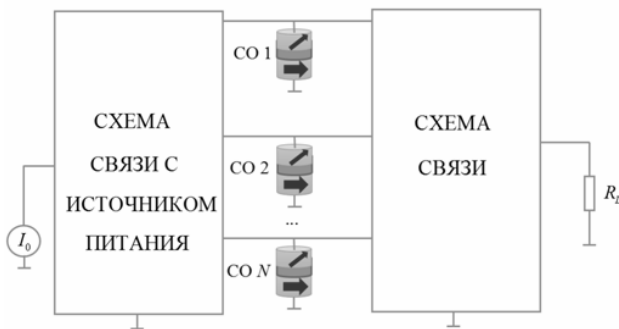


Рис.1. Блок-схема ансамбля спинтронных осцилляторов СО 1,2,...,N, взаимосвязанных друг с другом и с нагрузкой (с сопротивлением R_L). Осцилляторы питаются от источника постоянного тока I_0

Входную проводимость такого j -го элемента можно найти при холостом ходе на остальных его входах, а также ввести коэффициент передачи $\mathfrak{R}_{kj}$ по напряжению с j -го входа на k -й

$$y_{in,j}(p) = \det \hat{y} / \mathfrak{Z}_{jj}(p), \quad (2)$$

$$\mathfrak{R}_{kj}(p) = \mathfrak{Z}_{kj}(p) / \mathfrak{Z}_{jj}(p). \quad (3)$$

Таким образом, уравнение (1) с учетом (2), (3) можно переписать в виде

$$y_{in,j}(p) u_j = \sum_{k=1}^N \mathfrak{R}_{kj}(p) i_k. \quad (4)$$

Для вычисления спектра нормальных частот связанной системы необходимо положить $i_k = 0$ и искать решение уравнения $y_{in,j}(p) u_j = 0$, которое в общем

случае имеет вид $u_j = \sum_{l=1}^N U_{jl} \exp[(s_l t)]$, где $s_l = i\omega_l t + \theta_l$

— корни характеристического уравнения для определения нормальных мод. Если $\theta_l \ll \omega_l$, можно рассматривать колебания в системе, близкие к гармоническим, с медленно меняющимися амплитудами и фазами

$$u_j(t) = \sum_{l=1}^N U_{jl}(t) \exp[i\omega_l t + i\phi_{jl}(t)] = \sum_{l=1}^N U_{jl}(t) \exp[i\omega_l t]. \quad (5)$$

Здесь $U_{jl}(t)$ — комплексная амплитуда j -го осциллятора на l -й нормальной моде колебаний.

Входная проводимость j -го осциллятора $y_{in,j}$ вблизи нормальной частоты ω_l может быть разложена по степеням $\omega - \omega_l$ в виде

$$y_{in,j}(\omega - \omega_l) = y_{in,j}(\omega_l) + \left. \frac{\partial y_{in,j}}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_l, \theta_l=0} \times (\omega - \omega_l). \quad (6)$$

Подставив (5), (6) в (4) с учетом $i_k = [I_{a,k} + iI_{ar,k}] \times \exp(i(\omega_k t + \phi_k)) = \mathbf{I}_k \exp[i\omega_k t]$, где $I_{a,k}, I_{ar,k}$ — активная и реактивная части тока k -го активного элемента с комплексной амплитудой $\mathbf{I}_k$, получаем укороченные уравнения для амплитуды $U_{jl}(t)$ и фазы $\phi_{jl}(t)$

$$T_{jl} \frac{dU_{jl}}{dt} = Y_{a,jl} R_{jl} - U_{jl}; \quad T_{jl} U_{jl} \frac{d\phi_{jl}}{dt} = Y_{r,jl} R_{jl}, \quad (7)$$

где $T_{jl} = \frac{1}{y_{in,j}(\omega_l)} \left. \frac{\partial y_{in,j}}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_l, \theta_l=0}$ — постоянная времени

j -го осциллятора на нормальной частоте l , а $R_{jl} = 1/y_{in,j}(\omega_l)$ — его характеристическое сопротивление. Выражение для $Y_{a,jl}$ и $Y_{r,jl}$ представим в виде

$$Y_{a,jl} = \sum_{m=1}^N \mathfrak{R}_{mj}(\omega_l) I_{a,m}, \quad Y_{r,jl} = \sum_{m=1}^N \mathfrak{R}_{mj}(\omega_l) I_{r,m}. \quad (8)$$

Как известно [8], для СО комплексная амплитуда напряжения $U_{jl}(t)$ пропорциональна комплексной амплитуде спиновой волны $c_{jl}(t)$, которая находится из уравнения ЛЛГС. Далее нас будет интересовать одночастотный режим, и будем считать, что ансамбль работает на единственной нормальной моде ω_l . Вопрос о влиянии многомодовости на работу ансамбля является предметом отдельного исследования.

Синхронизация

Далее рассмотрим стационарный синхронный режим. При этом уравнения (7) с учетом (8) и приближенных выражений для активной и реактивной частей тока при разложении в обобщенные ряды Фурье [19] $I_{a,m} = I_{0,m} + I_{1c,m} \cos(\varphi_{jl})$ и $I_{r,m} = -I_{1s,m} \sin(\varphi_{jl})$ примут вид

$$T_{jl} \frac{dU_{jl}}{dt} = R_{jl} \sum_{m=1}^N \Re_{mj}(\omega_l) [I_{0,m} + I_{1c,m} \cos(\varphi_{jl})] - U_{jl}; \quad (9)$$

$$T_{jl} U_{jl} \frac{d\varphi_{jl}}{dt} = -R_{jl} \sum_{m=1}^N \Re_{mj}(\omega_l) I_{1s,m} \sin(\varphi_{jl}) \quad (10)$$

Очень часто [19] скорость установления амплитуды выше, чем скорость установления фазы, и можно в первом приближении рассматривать динамику системы таким образом, что амплитуды быстро выходят на стационарный уровень, а фазовая динамика происходит гораздо медленнее. Тогда уравнение для определения стационарных амплитуд U_{jl}^0 из (9) будет выглядеть

$$U_{jl}^0 = R_{jl} \sum_{m=1}^N \Re_{mj}(\omega_l) [I_{0,m}(U_{jl}^0) + I_{1c,m}(U_{jl}^0) \cos(\varphi_{jl})] \quad (11)$$

При этом уравнения (10) можно рассматривать как обобщенные фазовые уравнения Курамото [21].

В стационарном режиме по фазам можно найти полосу взаимной синхронизации, которая будет иметь вид

$$\Pi = \frac{2R_{jl}}{T_{jl}U_{jl}^0} \sum_{m=1}^N \Re_{mj}(\omega_l) I_{1s,m}(U_{jl}^0) \quad (12)$$

Оптимальный режим работы ансамбля

Нас будет интересовать энергетика ансамбля в режиме фазовой синхронизации (предыдущий раздел). Колебательная мощность, которую каждый j -й СО отдает в нагрузку в одномодовом режиме на частоте $\omega_l = \omega_0$, соответствующей частоте ферромагнитного резонанса, — $P_j = 0,5 I_{a,j}(U_j) U_j$. Максимальная мощность ансамбля задается суммой мощностей от каждого СО

$$P_{\max} = 0,5 \sum_{j=1}^N I_{a,j}(U_{j,opt}) U_{j,opt} \quad (13)$$

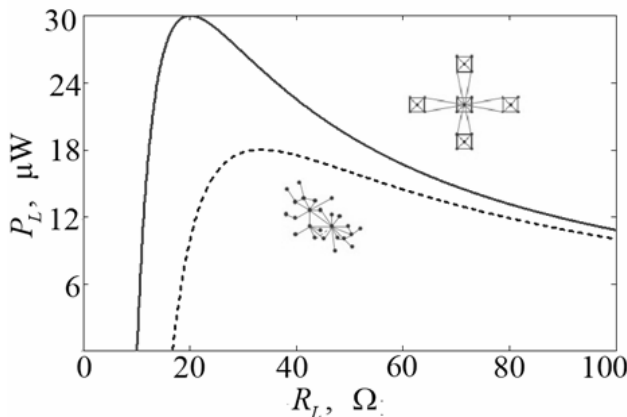


Рис.2. Нагрузочные характеристики системы сложения мощностей многих спинтронных осцилляторов для двух типов ансамблей: иерархического и случайного

Здесь $U_{j,opt}$ — оптимальная амплитуда напряжения j -го СО, которая соответствует максимуму отдаваемой мощности этого осциллятора. При заданном КПД схемы связи (рис.1) η максимальная мощность в нагрузке $P_L = \eta P_{\max}$. Для каждой конкретной топологии ансамбля и связей между элементами максимальная отдаваемая в нагрузку мощность будет разной. На рис.2 представлены два вида нагрузочных характеристик для $N=100$ СО, соединенных током. Как видно, иерархический ансамбль предпочтительнее для использования, так как от него можно получить большую мощность в нагрузке при одних и тех же параметрах и КПД цепи связи.

Заключение

В работе исследованы режимы работы ансамблей спинтронных осцилляторов (сложение мощностей в стационарном режиме, синхронизация) в общем виде с произвольной топологией объединения. Показано, что в иерархических сетях можно организовать лучшие показатели по сложению мощности в сравнении со случайно распределенной сетью при равных параметрах осцилляторов, связи и КПД.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-07-00485 и гранта Президента для молодых кандидатов наук № МК-283.2019.8.

1. Villard P. et al. A GHz spintronic-based RF oscillator // IEEE J. Solid-State Circ. 2010. V.45. №1. P.214-223.
2. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current // IEEE Trans. Mag. 2009. V.45. P.1875-1918.
3. Grollier J., Cros V., Fert A. Synchronization of Spin-transfer Oscillators Driven by Stimulated Microwave Currents // Phys. Rev. 2006. V.73. P.060409(R).
4. Georges B., Grollier J., Cros V., Fert A. Impact of the Electrical Connection of Spin Transfer Nano-oscillators on Their Synchronization: an Analytical Theory // Appl. Phys. Lett. 2008. V.92. P.232504.
5. 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.
6. Awad A. et al. Long-range Mutual Synchronization Of Spin Hall Nano-oscillators // Nat. Phys. 2016. V.14. P.1-9.
7. Lebrun R. et al. Mutual Sybchronization of Spin Torque Nanooscillators Through a Long-Range and Tunable Electrical Coupling Scheme // Nat. Comm. 2017. V.8. P.1-7.
8. Сафин А.Р. и др. Нагрузочные характеристики спин-трансферного наноосциллятора // Письма в ЖТФ. 2017. №6. С.56-63.
9. Сафин А.Р., Удалов Н.Н. Капранов М.В. Сравнение последовательной и параллельной схем сложения мощностей многих автогенераторов // Вестник МЭИ. 2018. №3. С.141-145.
10. Сафин А.Р., Удалов Н.Н., Татаренко А.С. Параллельная схема сложения мощностей многих спин-трансферных наноосцилляторов // Вестник НовГУ. 2018. №1(107). С.41-45.
11. Mitrofanov A., Safin A., Udalov N., Kapranov M. Theory of Spin Torque Nano-oscillator-based Phase-locked Loop // J. of Appl. Phys. 2017. V.122. P.123903.
12. Tamaru S. et al. Measurement of Shot Noise in Magnetic Tunnel Junction and its Utilization for Accurate System Calibration // J. Appl. Phys. 2017. V.122. P.193901.
13. Kreissig M. et al. Vortex Spin-torque Oscillator Stabilized by Phase Locked Loop Using Integrated Circuits // AIP Advances. 2017. V.7. P.056653.

14. 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.
15. Дворников А.А., Уткин Г.М. К теории автоколебательных систем сложения мощностей // Радиотехника и электроника. 1973. №8. С.1657-1666.
16. Дворников А.А., Уткин Г.М. О сложении мощностей многих автогенераторов // Радиотехника и электроника. 1974. №3. С.550-559.
17. Дворников А.А., Уткин Г.М. Некоторые вопросы теории взаимной синхронизации множества автогенераторов // Радиотехника. 1976. Т.31. №3. С.60-65.
18. Дворников А.А., Уткин Г.М. О взаимной синхронизации автогенераторов, работающих на связанные излучатели // Радиотехника и электроника. 1979. №11. С.2255-2261.
19. Дворников А.А., Уткин Г.М. Автогенераторы в радиотехнике. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
20. Torrejon J. et al. Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators // Nature. 2017. V.547. P.428-431.
21. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
9. Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V. Svravnenie posledovatel'noi i parallel'noi skhem slozheniia moshchnosti mnogikh avtogeneratorov [Comparison of serial and parallel power addition schemes of many autogenerators]. Bulletin of Moscow Power Engineering Institute (MPEI), 2018, no.3, p.141-145.
10. Safin A.R., Udalov N.N., Tatarenko A.S. Parallel'naia skhema slozheniia moshchnosti mnogikh spin-transferykh nanoostsiliatorov [Parallel capacity combination of many spin-transfer nanooscillators]. Vestnik of NovSU, 2018, no. 1(107), pp. 41-45.
11. Mitrofanov A., Safin A., Udalov N., Kapranov M. Theory of Spin Torque Nano-oscillator-based Phase-locked Loop. J. of Appl. Phys., 2017, vol. 122. P. 123903.
12. Tamaru S. et al. Measurement of Shot Noise in Magnetic Tunnel Junction and its Utilization for Accurate System Calibration. J. Appl. Phys., 2017, vol. 122. P. 193901.
13. Kreissig M. et al. Vortex Spin-torque Oscillator Stabilized by Phase Locked Loop Using Integrated Circuits. AIP Advances, 2017, vol. 7. P. 056653.
14. Safin A.R., Mitrofanov A.A., Udalov N.N., Kapranov M.V. Spektral'nyi analiz signalov s ispol'zovaniem spin-transfernogo nanoostsiliatora v rezhime sinkhronizatsii [Spectral analysis of signals using spin-transfer nano oscillator in synchronization mode]. Bulletin of Moscow Power Engineering Institute (MPEI), 2018, no. 5, pp. 166-171.
15. Dvornikov A.A., Utkin G.M. K teorii avtokolebatel'nykh sistem slozheniia moshchnosti [On the theory of auto-oscillatory power addition systems]. Radiotekhnika i elektronika - Radio Engineering and Electronics, 1973, no.8, p.1657-1666.
16. Dvornikov A.A., Utkin G.M. O slozhenii moshchnosti mnogikh avtogeneratorov [On the yield addition of many autogenerators]. Radiotekhnika i elektronika - Radio Engineering and Electronics, 1974, no. 3, pp. 550-559.
17. Dvornikov A.A., Utkin G.M. Nekotorye voprosy teorii vzaimnoi sinkhronizatsii mnozhestva avtogeneratorov [Some issues of the theory of mutual synchronization of the set of autogenerators]. Radiotekhnika i elektronika - Radio Engineering and Electronics, 1976, vol. 31, no. 3, pp. 60-65.
18. Dvornikov A.A., Utkin G.M. O vzaimnoi sinkhronizatsii avtogeneratorov, rabotaiushchikh na svyazannye izluchateli [On mutual synchronization of oscillators operating on associated emitters]. Radiotekhnika i elektronika - Radio Engineering and Electronics, 1979, no. 11, pp. 2255-2261.
19. Dvornikov A.A., Utkin G.M. Avtogeneratory v radiotekhnike [Oscillators in radio engineering]. Moscow, Radio i svyaz' - Radio and Communication, 1991. 224 p.
20. Torrejon J. et al. Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators. Nature, 2017, vol. 547, pp. 428-431.
21. Pikovskii A., Rozenblium M., Kurts Iu. Sinkhronizatsiia. Fundamental'noe nelineinoe iavlenie [Synchronization. Fundamental nonlinear phenomenon]. Moscow, "Tekhnosfera" Publ., 2003. 496 p.

References

1. Villard P. et al. A GHz spintronic-based RF oscillator. IEEE J. Solid-State Circ., 2010, vol.45, no.1, pp.214-223.
2. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current. IEEE Trans. Mag., 2009, vol.45, pp.1875-1918.
3. Grollier J., Cros V., Fert A. Synchronization of Spin-transfer Oscillators Driven by Stimulated Microwave Currents. Phys. Rev., 2006, vol.73. P. 060409(R).
4. Georges B., Grollier J., Cros V., Fert A. Impact of the Electrical Connection of Spin Transfer Nano-oscillators on Their Synchronization: An Analytical Theory. Appl. Phys. Lett., 2008, vol. 92. P.232504.
5. 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, vol.67. P.20601.
6. Awad A. et al. Long-range Mutual Synchronization of Spin Hall Nano-oscillators. Nat. Phys., 2016, vol.14. P.1-9.
7. Lebrun R. et al. Mutual Sybchronization of Spin Torque Nanooscillators Through a Long-Range and Tunable Electrical Coupling Scheme. Nat. Comm., 2017, vol.8, pp.1-7.
8. Safin A.R. et al. Nagruzochnye kharakteristiki spin-transfernogo nanoostsiliatora [Load characteristics of the spin-transfer nano oscillator]. Letter to the Journal of Technical Phisics (Technical Phisics.The Russian Journal of Applied Phosocs), 2017, no. 6, pp.56-63.