

11

Амплитудные и фазовые шумы спин-трансферного наноосциллятора, синхронизированного системой фазовой автоподстройки частоты

© А.А. Митрофанов¹, А.Р. Сафин^{1,2}, Н.Н. Удалов¹

¹ Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет „МГТУ

им. Н.Э. Баумана“, Москва, Россия

E-mail: mitrofanov_alexander@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 марта 2015 г.

Исследуются амплитудные и фазовые шумы спин-трансферного наноосциллятора (СТНО), синхронизированного системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Получены спектральные характеристики амплитудного и фазового шума изохронного и неизохронного СТНО. Проведено их сравнение с характеристиками несинхронизированного СТНО. Определена полоса пропускания системы ФАПЧ.

К современным радиотехническим приборам и элементам все чаще предъявляются повышенные требования к энергопотреблению и габаритам. Так, особый интерес вызывают устройства, чьи размеры в одном из направлений не превышают 100 нм. Таковыми являются спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО) [1–3], представляющие собой многослойные наноструктуры из чередующихся магнитных и немагнитных слоев. Простейшие образцы состоят из трех слоев — фиксированного, промежуточного и свободного. Благодаря эффекту спиновой поляризации из фиксированного слоя, чья намагниченность фиксирована, вытекает ток I , поляризованный по спине. Ток I воздействует на намагниченность свободного слоя и при значении I больше критического происходит прецессия намагниченности свободного слоя. Благодаря эффекту гигантского (в случае металлического промежуточного слоя) или туннельного магнетосопротивления (в случае диэлектрического промежуточного слоя) трехслойная структура имеет переменное квазигармоническое сопротивление, меняющееся с

частотой прецессии ферромагнитного резонанса. На данный момент, используя различные конфигурации нанослоев, удалось достичь частот генерации более 50 GHz [4]. Несмотря на преимущества, связанные с малыми размерами, низким энергопотреблением и совместимостью с технологией производства полупроводниковых микросхем КМОП, СТНО обладают существенными недостатками — низкой выходной мощностью единичного осциллятора и низкой стабильностью выходных колебаний. Ранее с помощью эффекта взаимной синхронизации нескольких СТНО решалась задача повышения мощности спинтронных устройств [5]. Одним из методов повышения стабильности колебаний является использование системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Физическая реализация фазового дискриминатора в наномасштабе возможна на основе перемножителя спиновых волн благодаря нелинейному эффекту — интермодуляционной неустойчивости, подробно описанной в [6]. Кроме того, с помощью системы ФАПЧ возможно реализовать измерение фазовых шумов СТНО [7]. Структурная схема системы и ее динамические процессы исследовались авторами в [8]. Задачей данной работы являлось определение шумовых характеристик синхронизированного цепью ФАПЧ СТНО и их сравнение с характеристиками автономного СТНО.

В качестве модели ФАПЧ СТНО с учетом влияния теплового шума используем модель Славина–Тиберкевича [9], дополненную токовым сигналом ошибки, вызванным разностью фаз эталонного и подстраиваемого генератора в виде

$$\frac{d\dot{c}}{dt} + j\omega (|\dot{c}|^2) \dot{c} + \Gamma_G (1 + Q|\dot{c}|^2) \dot{c} - \sigma I(1 - |\dot{c}|^2) \dot{c} = f_n(t), \quad (1)$$

где Q — коэффициент, характеризующий положительное нелинейное затухание, $I = I_0 + \Delta I = I_0(1 + \varepsilon K(p)F(\Delta\varphi))$ — ток, протекающий через СТНО, $K(p)$ — операторный коэффициент передачи фильтра в цепи управления, $F(\Delta\varphi)$ — нормированная дискриминационная характеристика фазового детектора, $p \equiv d/dt$ — оператор дифференцирования, $\varepsilon = \Delta I_{\max}/I_0$ — коэффициент усиления сигнала ошибки в цепи обратной связи, σ — коэффициент, характеризующий эффект переноса спина. Частота колебаний СТНО определяется следующим образом:

$$\omega = \omega_0 + N|\dot{c}|^2, \quad (2)$$

где ω_0 — частота ферромагнитного резонанса СТНО, зависящая от магнитного поля внутри образца, $|\dot{c}|^2$ — мощность спиновой волны, N — коэффициент, характеризующий степень зависимости частоты колебаний от квадрата амплитуды спиновой волны (коэффициент неизохронности), Γ_G — коэффициент спин-волновых положительных потерь, $f_n(t)$ — эквивалентный белый гауссовский шум:

$$\begin{cases} M\{f_n(t)\} = 0; \\ M\{f_n(t_1)f_n(t_2)\} = 2D\delta(t_2 - t_1), \end{cases} \quad (3)$$

где D — дисперсия шума, определяющая эффективную амплитуду шумовых колебаний, и $M\{\}$ — оператор математического ожидания. Дисперсия D прямо пропорциональна затуханию в системе и отношению мощности тепловых флуктуаций к мощности колебаний СТНО.

Из (1) при $K(p) = 1$ и $F(\Delta\varphi) = \sin(\Delta\varphi)$ можно получить систему уравнений относительно медленно меняющихся амплитуды колебаний $U(t)$ и фазы $\varphi(t)$ спиновой волны СТНО с учетом влияния цепи ФАПЧ и теплового шума в виде

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = U\Gamma_G [(\xi - 1 + \varepsilon \sin \Delta\varphi) - (\xi + Q + \varepsilon \sin \Delta - \varphi)U^2] + \text{Re}[\sqrt{D}\tilde{f}_n(t)]; \\ \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \Delta\omega + NU^2 + \text{Im}\left[\frac{\sqrt{D}}{U}\tilde{f}_n(t)\right], \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{ref}$, $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{ref}$, φ_{ref} и ω_{ref} — фаза и частота опорного генератора соответственно, $\xi = \sigma I / \Gamma_G$ — запас по самовозбуждению, $\sqrt{D}\tilde{f}_n(t) = e^{i\varphi(t)} f_n(t)$ [10].

Под действием шумов в СТНО возникают отклонения амплитуды $\delta u(t)$ и фазы $\delta\varphi(t)$ колебаний от стационарных значений (найденных ранее в [8])

$$\begin{aligned} U(t) &= U_0 + \delta u(t), \\ \Delta\varphi(t) &= \Delta\varphi_0 + \delta\varphi(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Линеаризовав систему (4) относительно стационарного устойчивого режима

$$U_0^2 = \frac{\xi - 1 - \varepsilon \sin(\Delta\varphi_0)}{\xi + Q + \varepsilon \sin(\Delta\varphi_0)}, \quad (6)$$

$$\Delta\varphi_0 = \arcsin \left[\frac{(\xi - 1) - \gamma(\xi + Q)}{\varepsilon(\gamma - 1)} \right], \quad (7)$$

где $\gamma = \Delta\omega/N$, перейдем к уравнениям относительно малых отклонений

$$\begin{cases} \frac{d\delta u}{dt} = \Gamma\delta u + E\delta\varphi + \sqrt{D}\tilde{f}_n(t), \\ \frac{d\delta\varphi}{dt} = N_l\delta u + \frac{\sqrt{D}}{U_0}\tilde{f}_n(t), \end{cases} \quad (8)$$

где Γ и E — коэффициенты линеаризации функции $U\Gamma_G[\xi - 1 + \varepsilon \sin(\Delta\varphi)] - (\xi + Q + \varepsilon \sin(\Delta\varphi))U^2$ в (4) по амплитуде U и разности фаз $\Delta\varphi$ соответственно, $N_l = 2N$ — линеаризованный коэффициент неизохронности.

Особенностью модели (8) является то, что с ее помощью можно описывать различные механизмы синхронизации, в том числе синхронизацию внешним гармоническим источником. В этом случае отличаются только численные значения коэффициентов Γ и E , которые определяются параметрами схемы синхронизации.

Влияние ФАПЧ в уравнениях (8) определяется слагаемым $E\delta\varphi$, которое зависит от разности фаз эталонного генератора и СТНО.

Используя спектральный метод [11], получим выражения для спектральных плотностей амплитудных и фазовых шумов

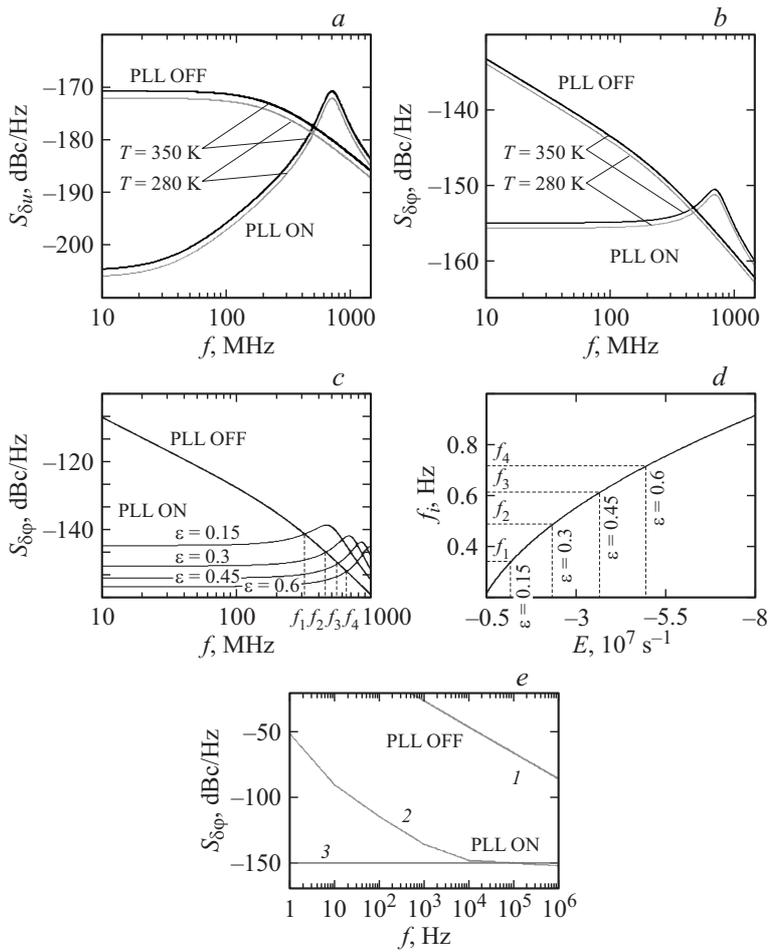
$$S_{\delta u} = |L_{\delta u}|^2 S_f = D \frac{\omega^2 + E_U^2}{(-\omega^2 - EN_l)^2 + \omega^2 \Gamma^2} S_f, \quad (9)$$

$$S_{\delta\varphi} = |L_{\delta\varphi}|^2 S_f = \left(\frac{D}{U_0^2} \right) \frac{\omega^2 + (N_l U_0 + \Gamma)^2}{(-\omega^2 - EN_l)^2 + \omega^2 \Gamma^2} S_f, \quad (10)$$

где $E_U = E/U_0$, $E_{U^2} = E/U_0^2$, S_f — спектральная плотность теплового шума. Для автономного СТНО ($E = 0$) они преобразуются к виду

$$\begin{aligned} S_{\delta u} &= |L_{\delta u}|^2 S_f = D \frac{1}{\omega^2 + \Gamma^2} S_f, \\ S_{\delta\varphi} &= |L_{\delta\varphi}|^2 S_f = \left(\frac{D}{U_0^2} \right) \frac{\omega^2 + (N_l U_0 + \Gamma)^2}{\omega^2(\omega^2 + \Gamma^2)} S_f. \end{aligned} \quad (11)$$

Зависимости спектральных плотностей амплитудных и фазовых флуктуаций при двух значениях температуры показаны на рисунке, *b*



Спектральная плотность амплитудных (a) и фазовых (b, c, d) шумов СТНО автономного (PLL OFF) и синхронизированного (PLL ON) СТНО при $\Gamma = -26 \cdot 10^8$ Hz, $N = 2.096 \cdot 10^{10}$ Hz, $E = -2.4 \cdot 10^7$ Hz, $U_0 = 0.621$. a — амплитудные шумы при $T = 280$ K и $T = 350$ K; b — фазовые шумы при $T = 280$ K и $T = 350$ K; c — фазовые шумы при $\epsilon = 0.15$, $\epsilon = 0.3$, $\epsilon = 0.45$ и $\epsilon = 0.6$; d — зависимость частоты среза f_i от коэффициента E; e — спектральная плотность фазовых шумов для автономного и синхронизированного СТНО с учетом шумов опорного генератора (1 — несинхронизированный СТНО, 2 — опорный генератор, 3 — синхронизированный СТНО).

соответственно. Видно, что значение спектральной плотности фазового шума значительно превышает спектральную плотность амплитудных шумов. Из второго уравнения (11) следует, что дисперсия фазового шума не имеет конечного значения. Это связано с тем, что отклонения фазы, вызванные шумами накапливаются, так как отсутствует возвращающая сила. Это характерно для всех автономных автогенераторов [11].

В случае использования системы ФАПЧ такая возвращающая сила существует, и спектральная плотность имеет конечное значение на нулевой частоте. Соответственно фазовые отклонения со временем в такой системе не накапливаются.

На рисунке, *c* построено семейство спектральных характеристик фазового шума синхронизированного СТНО при разных значениях ε . Для каждой зависимости отмечены частоты среза f_i , при превышении которых фазовые шумы синхронизированного СТНО определяются шумами автономного СТНО. Эти частоты определяется линеаризованным коэффициентом фазовой автоподстройки $E(\varepsilon)$, который в свою очередь зависит от коэффициента усиления сигнала ошибки в цепи обратной связи системы ФАПЧ

$$f_i = \sqrt{-0.5E(\varepsilon)N_i}. \quad (12)$$

Зависимость $f_i(E)$ показана на рисунке, *d*. Из (12) следует, что, регулируя параметры системы ФАПЧ, можно увеличить область частот, в которой благодаря синхронизации уменьшаются шумы СТНО.

Очевидно, что шумы синхронизированного СТНО не могут быть меньше шумов опорного генератора. Таким образом, в режиме синхронизации при малых отстройках шумы СТНО будут определяться шумами опорного высокостабильного генератора [11]. На рисунке, *e* показана спектральная плотность фазовых шумов с учетом влияния шумов опорного генератора.

Таким образом, проведен анализ шумовых характеристик синхронизированного цепью ФАПЧ СТНО и их сравнение с характеристиками автономного СТНО. Были получены и построены спектральные плотности амплитудных и фазовых флуктуаций. Проведенный статистический анализ может иметь важное значение при построении стабильных миниатюрных генераторов на базе СТНО.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-01278 А.

Список литературы

- [1] *Slonczewskz J.* // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 159. P. L1–L7.
- [2] *Berger L.* // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 9353–9358.
- [3] *Rippard W.H., Pufall M.R., Kaka S.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 027 201.
- [4] *Stefano Bonetti* et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 102 507.
- [5] *Safin A.R., Udalov N.N.* // Eur. Phys. Journ. Appl. Phys. 2014. V. 67. P. 20 601.
- [6] *Дроздовский А.В., Калинин Б.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. В. 7.
- [7] *Villard P., Ebels U., Houssameddine D.* et al. // IEEE J. Solid State Circuits. 2010. V. 45. N 1. P. 214–223.
- [8] *Митрофанов А.А., Сафин А.Р., Удалов Н.Н.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 13. С. 66–72.
- [9] *Slavin A., Tiberkevich V.* // IEEE Trans. Magn. 2009. V. 45. P. 1875.
- [10] *Kim J.-V., Tiberkevich V.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 017 207.
- [11] *Жалуд В., Кулешов В.Н.* Шумы в полупроводниковых устройствах. М.: Сов. радио, 1977. С. 338.