

07

Система фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора

© А.А. Митрофанов, А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов

Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва

E-mail: mitrofanov_alexander@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 марта 2014 г.

Исследована динамика бесфильтровой системы фазовой синхронизации (СФС) спин-трансферного наноосциллятора (СТНО), генерирующего СВЧ-колебания в широком диапазоне частот под действием постоянного тока и внешнего магнитного поля. Рассмотрены бифуркации системы при изменении частотной расстройки синхронизируемых колебаний. Определены полосы синхронизма и захвата. Существование полосы захвата в бесфильтровой СФС СТНО принципиально отличает такие генераторы от других генераторов СВЧ-колебаний.

Одним из новых направлений электроники является спинтроника, в которой ключевую роль играет не заряд электрона, а его собственный магнитный момент — спин. Важным шагом в развитии спинтроники были работы Дж. Слончевского (Slonczewski) [1] и Л. Берже (Berger) [2], которые показали возможность генерации СВЧ-колебаний при пропускании через образец, состоящий из чередующихся магнитных и немагнитных слоев, электрического тока за счет эффекта переноса спинового момента от одного слоя к другому. Это направление приобрело большую популярность, а генераторы получили особое название — спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО).

Кроме преимуществ, связанных со сверхмалыми размерами и широким диапазоном перестройки частоты под действием магнитного поля и тока, современные СТНО обладают недостатками: низкой выходной мощностью и широкой спектральной линией. Одним из методов уменьшения ширины спектральной линии генерируемых СТНО колебаний является использование механизма фазовой синхронизации. В эксперименте [3] было показано, что СФС позволяет уменьшить ширину спектральной линии СТНО. Первой теоретической работой по фазовой синхронизации СТНО является работа В.Д. Шалфеева и К.Г. Мишаги-

на [4], в которой были теоретически исследованы различные режимы схемы фазовой синхронизации СТНО с интегрирующим фильтром в цепи управления (ЦУ). Ими было показано, что полоса синхронизма в этом случае превосходит полосу синхронизма при непосредственном воздействии на СТНО внешнего гармонического источника. Ими также было предсказано существование полосы захвата в бесфильтровой СФС СТНО. В данной работе рассматриваются бифуркации бесфильтровой СФС СТНО при изменении частотной расстройки между колебаниями СТНО и эталонного источника, а также определены полосы синхронизма и захвата.

Описание принципа работы схемы СФС СТНО подробно обсуждалось в [4] и здесь не приводится. Перейдем к исследованию процессов в рассматриваемой структуре и соответствующим математическим моделям. В отличие от подхода, рассмотренного в [4] и основанного на непосредственном интегрировании уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта, дополненного слагаемым Слончевского–Берже [1,2], как основу модели СТНО удобно использовать модель Славина–Тиберкевича (о применимости этого подхода см. подробнее [5]). Для получения модели СФС СТНО дополним модель Славина–Тиберкевича, с учетом влияния токового сигнала ошибки, вызванного разностью фаз эталонного и подстраиваемого генератора в виде

$$\frac{d\dot{c}}{dt} + j\omega (|\dot{c}|^2) \dot{c} + \Gamma_G (1 + Q|\dot{c}|^2) \dot{c} - \sigma I (1 - |\dot{c}|^2) \dot{c} = 0, \quad (1)$$

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, $\varepsilon = \Delta I_{\max}/I_0$, 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 (см. подробнее [1]), $\Gamma_G = \alpha_G \omega_0$ — коэффициент спин-волновых положительных потерь свободного слоя, α_G — коэффициент затухания.

На основе (1) в бесфильтровом случае при $F(\Delta\varphi) = \sin \Delta\varphi$ можно получить систему уравнений относительно медленно меняющихся амплитуды колебаний $U(t)$ и фазы $\varphi(t)$ спиновой волны СТНО с учетом влияния цепи фазовой синхронизации. Запишем соответствующую модель в виде

$$\begin{cases} \frac{dU}{d\omega_0 t} = U\Gamma_G [(\xi - 1 + \varepsilon \sin(\Delta\varphi)) - (\xi + Q + \varepsilon \sin(\Delta\varphi))U^2], \\ \frac{d\Delta\varphi}{d\omega_0 t} = \Delta\omega + NU^2, \end{cases} \quad (3)$$

где $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{ref}$, $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{ref}$. Здесь φ_{ref} , ω_{ref} — соответственно фаза и частота эталонного генератора. Таким образом, $\Delta\omega$ определяет разность частот ферромагнитного резонанса свободного слоя СТНО и эталонного генератора. В случае, когда частота колебаний СТНО равна частоте эталонного генератора, правая часть 2 уравнения (3) равна нулю и, следовательно, $\Delta\omega = -N(U^0)^2$, где U^0 — стационарное значение амплитуды колебаний СТНО.

Проанализируем систему (3) методом фазового пространства. Уравнение для касательных к фазовым траекториям системы запишем в виде

$$\frac{dU}{d\Delta\varphi} = \frac{U\Gamma_G [(\xi - 1 + \varepsilon \sin(\Delta\varphi)) - (\xi + Q + \varepsilon \sin(\Delta\varphi))U^2]}{\Delta\omega + NU^2}. \quad (4)$$

Особенностью полученной системы является то, что в качестве оси ординат выбрана амплитуда колебаний, а не первая производная разности фаз [6], как это обычно рассматривается в теории СФС макроскопических автогенераторов. Однако несмотря на это, фазовые портреты имеют вид, схожий с классической системой фазовой синхронизации. При этом стационарным синхронным режимам соответствуют точки пересечения изоклин горизонтальной и вертикальной касательных. Изоклине вертикальной касательной (ИВК) соответствует стационарное значение амплитуды U^0 , а изоклине с горизонтальной касательной (ИГК) соответствуют 2π -периодическая функция и ось абсцисс, причем стационарные ненулевое значение амплитуды и значение разности фаз зависят от начальной разности частот.

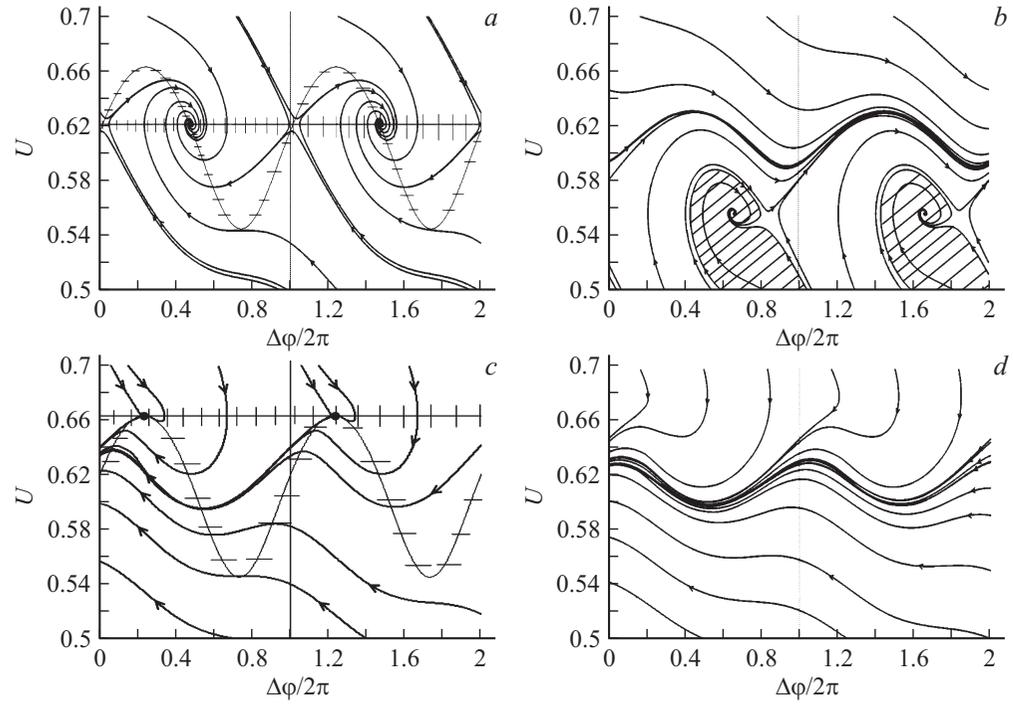


Рис. 1. Фазовые портреты системы при $N = 10.48$ GHz, $\omega_0/2\pi = 12.41$ GHz, $Q = 0.66$, $\sigma = 61.5$ GHz/A, $\varepsilon = 0.3$, $\alpha = 0.01$, $\xi = 2$. *a* — режим синхронизма ($\Delta\omega/2\pi = -4.04$ GHz), *b* — режим квазисинхронизма ($\Delta\omega/2\pi = -4.44$ GHz), *c* — седлоузловая бифуркация ($\Delta\omega/2\pi = -4.61$ GHz), *d* — режим биений ($\Delta\omega/2\pi = -4.84$ GHz).

На рис. 1, *a* представлен фазовый портрет, соответствующий режиму синхронизма, показаны две особые точки: устойчивый фокус и седло. При увеличении частотной расстройки происходит бифуркация слияния выходящей и входящей сепаратрис седла с образованием полуустойчивого предельного цикла 2-го рода. Данное значение расстройки соответствует разности частот, равной полосе захвата. При дальнейшем увеличении частотной расстройки полуустойчивый предельный цикл превращается в устойчивый предельный цикл (рис.1, *b*), а входящая сепаратриса образует петлю (заштрихованная область), ограничивающую область начальных условий, при которых система приходит в устойчивое состояние. Наконец, при дальнейшем увеличении частотной расстройки, равной полосе синхронизма, происходит седлоузловая бифуркация, соответствующая слиянию устойчивой и неустойчивой особых точек (рис. 1, *c*).

При расстройках больше полосы синхронизма, когда ИГК и ИВК не пересекаются, система переходит в асинхронный режим и происходит набег фазы при осцилляции амплитуды с частотой биений (рис. 1, *d*).

Для модели (3) можно получить выражения для стационарных значений амплитуды и фазы

$$(U^0)^2 = \frac{\xi - 1 + \varepsilon \sin(\Delta\varphi^0)}{\xi + Q + \varepsilon \sin(\Delta\varphi^0)}, \quad (5)$$

$$\Delta\varphi^0 = \arcsin \left[\frac{(\xi - 1) - \gamma(\xi + Q)}{\xi(\gamma - 1)} \right], \quad (6)$$

где $\gamma = \Delta\omega/N$ — обобщенная расстройка.

Подставив (5) во второе уравнение системы (3), с учетом $d\Delta\varphi^0/dt = 0$:

$$\Delta\omega = -N \frac{\xi - 1 + \varepsilon \sin(\Delta\varphi^0)}{\xi + Q + \varepsilon \sin(\Delta\varphi^0)}. \quad (7)$$

Это уравнение позволяет определить полосу синхронизма. Особенностью рассмотренной системы является то, что сигнал фазового дискриминатора приводит к изменению амплитуды и частоты колебаний СТНО. В этом проявляется неизохронность таких генераторов. Следствием этого является существование полосы захвата бесфильтровой системы фазовой синхронизации. При этом наблюдается несимметричность полосы синхронизма при различных знаках начальной расстройки

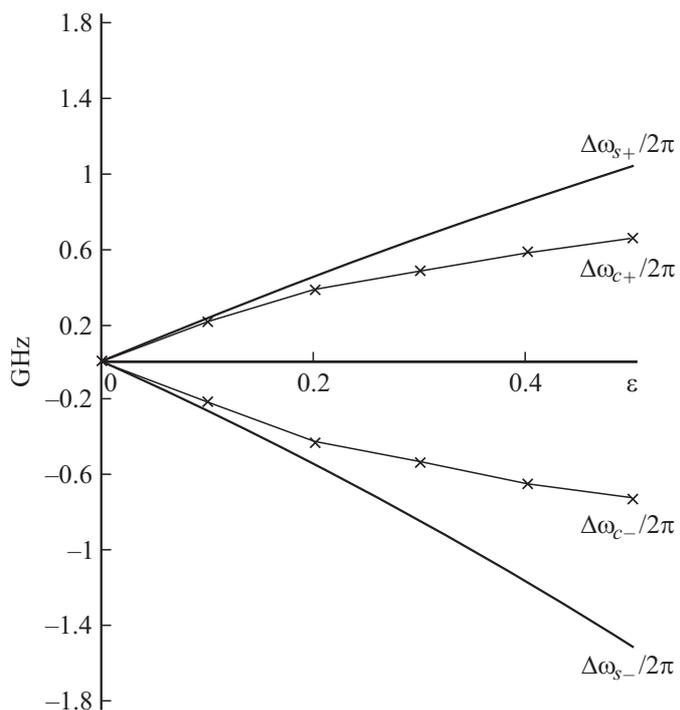


Рис. 2. Полоса синхронизма $\Delta\omega_s$ и захвата $\Delta\omega_c$ относительно параметра фазовой синхронизации ε .

частот СТНО и эталонного генератора. Как следует из (7), для положительных и соответственно отрицательных знаков расстроек полоса синхронизма определяется следующим образом:

$$\Delta\omega_{s+} = N \frac{\xi - 1 + \varepsilon}{\xi + Q + \varepsilon} - N \frac{\xi - 1}{\xi + Q}, \quad (8)$$

$$\Delta\omega_{s-} = N \frac{\xi - 1 - \varepsilon}{\xi + Q - \varepsilon} - N \frac{\xi - 1}{\xi + Q}. \quad (9)$$

Основной вклад в величины полос синхронизма и захвата вносит параметр ε -максимального значения нормированного сигнала ошибки.

На рис. 2 показана зависимость полосы синхронизма $\Delta\omega_s$ (8), (9) и полосы захвата $\Delta\omega_c$ (моделирование) в зависимости от параметра ε . Ограничением выбора максимального значения ε является линейный участок регулировочной характеристики СТНО, на котором амплитуда колебаний остается достаточной для работы фазового дискриминатора. Кроме того, при увеличении ε , как показывает моделирование, увеличивается время вхождения в синхронизм, что существенно для решения практических задач построения системы фазовой синхронизации СТНО.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг. (соглашения № 14.В.37.21.1211, 14.132.21.1665), а также РФФИ (договор № 13-08-012783).

Список литературы

- [1] *Slonczewski J.* // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 159. P. L1.
- [2] *Berger L.* // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 9353–9358.
- [3] *Villard P.* et al. // IEEE J. Solid-state circuits. 2010. V. 45. N 1. P. 214–223.
- [4] *Шалфеев В.Д., Мишагин К.Г.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 22. С. 51–57.
- [5] *Slavin A., Tiberkevich V.* // IEEE Trans. on Magnetics. 2009. V. 45. N 4. P. 1875–1918.
- [6] *Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М.* Теория колебаний в радиотехнике. М.: Наука, 1984. 320 с.