

ПОЛОСА ЗАХВАТА СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ СПИН-ТРАНСФЕРНОГО НАНООСЦИЛЛЯТОРА

Митрофанов Александр Александрович,
аспирант, Национальный Исследовательский Университет
"МЭИ", Россия, Москва,
mitrofanov_alexander@mail.ru

Сафин Ансар Ризаевич,
к.т.н., Национальный Исследовательский Университет
"МЭИ", Россия, Москва,
arsafin@gmail.com

Удалов Николай Николаевич,
д.т.н., профессор, Национальный Исследовательский
Университет "МЭИ", Россия, Москва,
udalovnn@rambler.ru

Ключевые слова: спинтроника, спин-трансферные
наноосцилляторы, синхронизация, фазовая
автоподстройка частоты, полоса захвата.

Одним из перспективных устройств генерирования СВЧ колебаний являются спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО) [1,2]. Физически СТНО представляют собой многослойную структуру с толщиной слоев от единиц до сотен нанометров. В зависимости от конструкции СТНО состоит из ферромагнитных или антиферромагнитных слоев, разделенных немагнитным промежуточным слоем. Причиной большого интереса к этим устройствам является сверхмалые размеры (например, конструкция "наностолб" имеет радиус 100 нм и высоту от 10 нм), широкий диапазон перестройки частоты под действием постоянного тока и внешнего магнитного поля, радиационная стойкость. Однако такие генераторы обладают существенными недостатками – низкой выходной мощностью и широкой спектральной линией колебаний СТНО. Способам решения этих недостатков посвящено большое количество работ. Одним из способов сужения спектральной линии является использование системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) СТНО эталонным источником колебаний [3].

Основным научно-техническим подходом в анализе системы ФАПЧ СТНО является метод С.И. Евтянова из общей теории нелинейных колебаний и динамических систем [4]. Этот метод позволяет получить "укороченные уравнения" для амплитуды и фазы комплексной спиновой волны, генерируемой СТНО. Анализ полученных уравнений произведен с помощью фазовых портретов при различных параметрах системы. Произведен анализ бифуркаций в системе. Показано, что метод С.И. Евтянова позволяет определить полосу синхронизма и обнаружить полосу захвата в бесфильтровой системе ФАПЧ. Явление полосы захвата обычно проявляется только в системах ФАПЧ с фильтром в цепи управления. Существование полосы захвата в бесфильтровой системе является особенностью предложенной авторами системы. Этот феномен связан с неизохронностью СТНО – влиянием амплитуды колебаний на частоту. Система ФАПЧ работает таким образом, что сигнал ошибки меняет значение амплитуды колебаний, которое, в свою очередь меняет значение частоты. Инерционность изменения частоты вслед изменению амплитуды является аналогом фильтра в классической системе ФАПЧ.

Для цитирования:

Митрофанов А.А., Сафин А.Р., Удалов Н.Н. Полоса захвата системы фазовой автоподстройки частоты СПИН-трансферного наноосциллятора // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. Том. 9. – №3. – С. 28-31.

For citation:

Mitrofanov A.A., Safin A.R., Udalov N.N. Capture range of the phase locked loop system of the SPIN-torque nanooscillator. T-Comm. 2015. Vol. 9. No.3. Pp. 28-31. (in Russian).

Наиболее перспективным развитием современных электронных устройств и компонентов является уменьшение размеров составляющих их элементов, повышение их надежности и стабильности, расширение функциональных возможностей и режимов работы при уменьшении значения потребляемой энергии. Данные требования вдвойне актуальны для космических систем связи, навигации, медицинской и военной техники, портативных и мобильных устройств. Одним из ключевых узлов перечисленных систем является генератор СВЧ-колебаний, выполняющий функции опорного сигнала для обработки входного сигнала и системах слежения, задающего тактового генератора в цифровых системах, системах передачи данных в качестве модулируемого сигнала и многие другие.

Одним из устройств, которые удовлетворяют широкому спектру требований являются, так называемые, спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО), которые представляют собой многослойную (от трех слоев) структуру, диаметром до 100 нм и толщиной в 10-30 нм. Принцип работы СТНО основан на эффекте гигантского магнетосопротивления, за что в 2007 г. была вручена Нобелевская премия за передовые исследования, приведшие к бурному росту плотности магнитной памяти в конце XX в. Преимуществами СТНО являются: компактные размеры, широкий диапазон перестройки частоты, интегрируемость с технологическим процессом КМОП, малые рабочие напряжения и токи (менее 0,3 В), малое время переходного процесса (единицы наносекунд), линейная зависимость частоты от управляющего внешнего постоянного тока или внешнего магнитного поля.

Первой теоретической работой по фазовой синхронизации является работа К.Г. Мишагина и В.Д. Шалфеева [3], в которой построена математическая модель такой системы, определены существующие режимы и бифуркации. Однако предложенная модель оперирует с ненаблюдаемыми в эксперименте физическими величинами и достаточно сложна для анализа. Альтернативным способом моделирования динамики ФАПЧ СТНО является использование уравнения Славина-Тиберкевича [2] относительно комплексных амплитуд спиновых волн, позволяющих непосредственно определить мощность и частоту выходных колебаний. Структурная схема системы ФАПЧ СТНО показана на рис. 1.

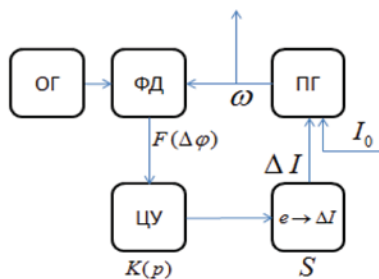


Рис. 1. Структурная схема системы ФАПЧ СТНО.

Введены обозначения: ОГ – опорный генератор; ФД – фазовый дискриминатор; ПГ – подстраиваемый генератор (СТНО); ЦУ – цель управления; $e \rightarrow \Delta I$ – преобразователь напряжение-ток

Для получения модели ФАПЧ СТНО дополним модель Славина-Тиберкевича токовым сигналом ошибки, вызванным разностью фаз эталонного и подстраиваемого генератора в виде:

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

где $I = I_0 + \Delta I = I_0(1 + \varepsilon K(p)F(\Delta\varphi))$ – 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, $\varepsilon = \Delta I / I_0$ – коэффициент усиления сигнала ошибки.

От модели Славина-Тиберкевича можно перейти к уравнениям относительно медленно-меняющихся амплитуды колебаний СТНО и разности фаз колебаний СТНО и эталонного генератора [5]:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = U\Gamma_G[(\zeta - 1 + \varepsilon K(p)F(\varphi)) - (\zeta + Q + \varepsilon K(p)F(\varphi))U^2]; \\ \frac{d\varphi}{dt} = \Delta\omega + NU^2, \end{cases} \quad (2)$$

где $\varphi = \varphi_{СТНО} - \varphi_{ОГ}$, $\omega = \omega_{СТНО} - \omega_{ОГ}$. Здесь $\varphi_{ОГ}$, $\omega_{ОГ}$ – фаза и частота, соответственно, эталонного генератора, $\varphi_{СТНО}$, $\omega_{СТНО}$ – фаза и частота, соответственно, СТНО. U – амплитуда колебаний СТНО. Частота СТНО ω без учета ФАПЧ имеет вид:

$$\omega = \omega_0 + NU^2, \quad (3)$$

где ω_0 – частота ферромагнитного резонанса, N – коэффициент неизохронности. Параметры Γ_G , Q – константы, характеризующие линейное и нелинейное затухание. Запас по самовозбуждению ξ определяется величиной тока, протекающего через СТНО. ε – коэффициент усиления сигнала ошибки в цепи ФАПЧ. Для анализа динамических процессов системы синхронизации удобно использовать метод фазовой плоскости. На рис. 2а 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 (рис. 2б), а входящая сепаратриса образует петлю (заштрихованная область), ограничивающую область начальных условий, при которых система приходит в устойчивое состояние.

При дальнейшем увеличении частотной расстройки происходит седло-узловая бифуркация, соответствующая слиянию устойчивой и неустойчивой особых точек (рис. 2в). При расстройках, больше полосы синхронизма, когда изоклины горизонтальной и вертикальной касательных не пересекаются, система переходит в асинхронный режим и проис-

ходит набег фазы при осцилляции амплитуды с частотой биений (рис. 2г). Существенным отличием бесфильтровой системы фазовой синхронизации СТНО от классических систем является существование полосы захвата.

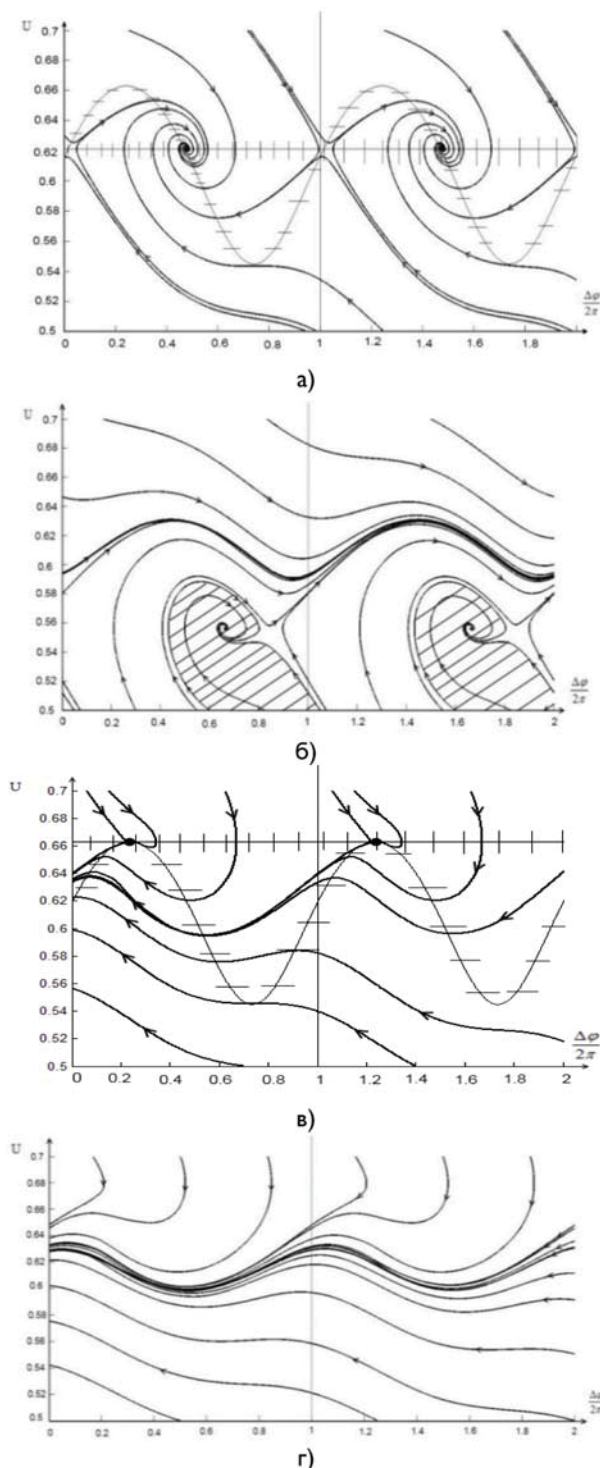


Рис. 2. Фазовые портреты системы при $N = 10,48$ ГГц, $\omega_0/2\pi = 12,41$ ГГц, $Q = 0,66$, $\sigma = 61,5$ ГГц/А, $\varepsilon = 0,3$, $\alpha = 0,01$, $\xi = 2$

На рис. 3 показана зависимость амплитуды колебаний в установившемся режиме от разности частот эталонного генератора и СТНО Δf . На рисунке отмечены области синхронизма Δf_c и захвата Δf_3 .

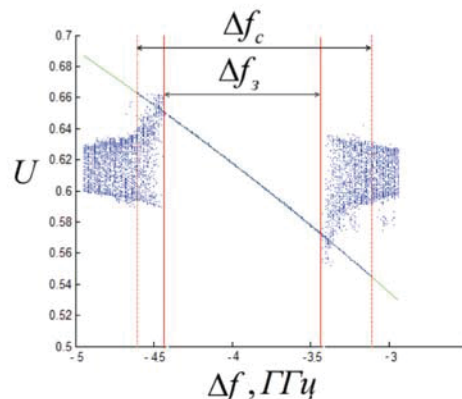


Рис. 3. Зависимость установившейся амплитуды колебаний U от разности частот эталонного генератора и СТНО Δf

Таким образом, полученная модель позволяет определить режимы в системе ФАПЧ СТНО, численно определить значение полосы синхронизма и захвата в такой системе.

Проведенный анализ динамики системы может иметь большое значение при построении стабильных миниатюрных источников колебаний на основе СТНО.

Литература

1. Rippard W.H., Pufall M.R., and Russek S.E. Comparison of frequency, linewidth, and output power in measurements of spin-transfer nanocontact oscillators / Phys. Rev. B, vol. 74, 2006, pp. 224-409.
2. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current/ IEEE Trans. on Magnetics. V.45, 2009, №4.
3. Шалфеев В.Д., Мишагин К.Г. Синхронизация спинового наногенератора с использованием цепи фазовой автоподстройки // Письма в ЖТФ. – Т.36, вып.22, 2010. – С. 51-57.
4. Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М. Теория колебаний в радиотехнике. – М., 1984. – 320 с.
5. Митрофанов А.А., Сафин А.Р., Удалов Н.Н. Система фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора // Письма в ЖТФ. – Т.40, вып.13, 2014. – С. 66-72.

CAPTURE RANGE OF THE PHASE LOCKED LOOP SYSTEM OF THE SPIN-TORQUE NANOOSCILLATOR

Mitrofanov A.A., Safin A.R., Udalov N.N., Moscow, Russia, mitrofanov_alexander@mail.ru

Abstract

One of the perspective microwave generators is so-called spin-torque nanooscillators (STNO) [1, 2]. STNO is a multilayer magnetic structure with layer's thickness up to 100 nm. The reasons for the great interest in these devices are radiation resistance, the ultra-small size (for example, the "nanopillar" construction has a radius of 100 nm and a height of 10 nm), a wide range of swept frequency, which is tuned by a DC current and the external magnetic field. However, these generators have significant disadvantages - low output power and broad spectral line of the oscillations. A large number of works are focused on a solution of these problems. Using a phase-locked loop (PLL) is one of the methods of narrowing the spectral line [3, 4].

The main scientific and technical approach to the analysis of the PLL is the Evtyanov's method from the general theory of nonlinear oscillations and dynamic systems [5]. This method allows getting a "short equations" for the amplitude and phase of the complex spin wave, which is generated by STNO. The analysis of bifurcations for different parameters of the system is produced. It is shown that the Evtyanov's method allows detecting the capture band in PLL without filter in feedback loop. The existence of a capture band is a feature of the proposed by the authors system. This phenomenon is associated with nonisochrony STNO - amplitude has an impact on the frequency of the oscillation. The PLL works in the following way: the signal of phase difference between STNO and reference generator changes the amplitude of STNO oscillations, which changes the frequency. The inertia of the frequency changes after tuning of the amplitude is an analogue of filter's delay time in classical PLL.

Keywords: spintronics, the spin-transfer nanooscillators synchronization, phase-locked loop, locking band.

References

1. Rippard W.H., Pufall M.R. and Russek S.E. Comparison of frequency, linewidth, and output power in measurements of spin-transfer nanocontact oscillators / Phys. Rev. B, vol. 74, 2006, p. 224-409.
2. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current / IEEE Trans. on Magnetics. Vol. 45, 2009, No 4.
3. Shalfeev V.D., Mishagin K.G. Synchronization of spin-transfer nanooscillator using phase-locking loop / Technical Physics Letters, 36-11, 2010. (in Russian).
4. Kapranov M.V., Kuleshov V.N. and Utkin G.M. Theory of Oscillations in Radio Engineering. Moscow, 1984. 320 p. (in Russian).
5. Mitrofanov A.A., Safin A.R., Udalov N.N. Phase Locked Loop of the Spin-Torque Nanooscillator. Technical Physics Letters, 40-7, 2014. (in Russian).

Information about authors:

Mitrofanov A.A., Safin A.R., Udalov N.N., National Research University "MPEI", Moscow, Russia

For citation:

Mitrofanov A.A., Safin A.R., Udalov N.N. Capture range of the phase locked loop system of the SPIN-torque nanooscillator. T-Comm. 2015. Vol. 9. No.3. Pp. 28-31. (in Russian).