

**Стремоухов П.А., Сафин А.Р.**

Национальный исследовательский университет

“Московский энергетический институт”

## **Синхронизация вихревых спин-трансферных наноосцилляторов внешним гармоническим воздействием**

*На основе уравнения Тилля получены укороченные уравнения для медленно меняющихся амплитуды и фазы вихревого спин-трансферного наноосциллятора (СТНО) синхронизированного внешним гармоническим воздействием. Полученные укороченные уравнения отличаются от уравнений для осциллятора Ван дер Поля существенным неизохронным слагаемым в фазовом уравнении, что существенно влияет на динамику. Исследуется динамика такой системы на фазовой плоскости. В докладе также рассмотрены такие инженерные вопросы как: максимизация колебаний мощности и получение оптимальной нагрузки.*

**Ключевые слова:** перенос спина, синхронизация, осциллятор, вихревая динамика.

Магнитные вихри в настоящее время представляют значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной стороны. Особый интерес вызывают вихри, образующиеся в магнитных наноструктурах при протекании через них спин-поляризованного тока в результате эффекта переноса спина (т.н. «spin-transfer torque»). На основе подобной вихревой динамики намагниченности в магнитных наноструктурах могут быть реализованы принципиально новые миниатюрные генераторы микроволнового диапазона широко перестраиваемых по частоте, т.н. «спин-трансферные наноосцилляторы» (СТНО). В отличие от однородных вихревые СТНО обладают существенными преимуществами: меньшей шириной спектральной линии (около 1 МГц на частотах до 1 ГГц), большей выходной мощностью (около 1 мкВт), отсутствием внешнего магнитного поля. Для практического использования таких генераторов необходимо уменьшить ширину спектральной линии СТНО. Одним из методов уменьшения ширины спектральной линии генерируемых вихревым СТНО колебаний является использование внешней синхронизации гармоническим высокочастотным током или магнитным полем.

В работе на основе уравнения Тилля для кора (центра) вихря получены укороченные уравнения для медленно меняющихся амплитуды  $U$  и разности фаз  $\psi = \varphi_0 - \varphi_{стно}$  вихревого СТНО при синхронизации его внешним гармоническим источником:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = \Gamma(U_0^2 - U^2) \cdot U + \gamma \cdot \cos \psi \\ \frac{d\psi}{dt} = \Delta\omega + N \cdot U^2 - \frac{\gamma}{U} \sin \psi \end{cases}$$

Здесь  $U_0$  стационарная амплитуда колебаний без учета внешнего воздействия,  $\gamma$  нормированная амплитуда внешнего воздействия (тока или магнитного поля),  $\Delta\omega$  разность между частотой внешнего воздействия  $\omega_0$  и постоянной частотой СТНО  $\omega_{стно}$ , с фазами  $\varphi_0$  и  $\varphi_{стно}$ , соответственно,  $N$  - параметр неизохронности и  $\Gamma$  – физический параметр.

На первом этапе были найдены стационарная амплитуда  $\tilde{U}_0$  и разность фаз  $\psi_0$ , используя метод медленно меняющихся амплитуд, была обнаружена область устойчивости на плоскости управляющих параметров.

На втором этапе был проведен анализ основных бифуркаций исследуемой системы и топологии фазового пространства.

В заключении были получены области изменения управляющих параметров, при которых реализуется режим фазовой синхронизации (полоса синхронизма).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых-кандидатов наук (грант № МК- 7026.2016.8).

#### Библиографический список

1. Andrei Slavin & Vasil Tiberkevich (2009), IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, 1875- 1918.
2. Yuri Gaididei, Volodymyr P. Kravchuk, Denis D. Sheka (2009), International Journal of Quantum Chemistry, Vol. 110, 83–97.
3. Junyeon Kim & Sug-Bong Choe (2007), Journal of Magnetics, 12(3), 113-117.
4. B.A. Ivanov & C.E. Zaspel (2007), Physical Review Letters, PRL 99, 247208.
5. P. N. Skirdkov, K. A. Zvezdin, A. D. Belanovsky, J. M. George, J. C. Wu, V. Cros, and A. K. Zvezdin // Phys. Rev. B 92, 094432 (2015)
6. A. V. Khvalkovskiy, J. Grollier, A. Dussaux, K. A. Zvezdin, and V. Cros // Phys. Rev. B 80, 140401(R) (2009)