01;07

Взаимная синхронизация наногенераторов, связанных с помощью спиновых волн

© К.Н. Алешин, В.В. Матросов, К.Г. Мишагин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
E-mail: kirill_al@bk.ru

Поступило в Редакцию 26 июля 2017 г.

Рассмотрены динамические режимы системы двух наногенераторов, связанных через спиновые волны, в зависимости от силы связи и частотной расстройки между ними. Получено разбиение пространства параметров системы на области существования различных динамических режимов: синхронного, квазисинхронного, биений и подавления колебаний генераторов. Выделены области мультистабильного поведения. Исследовано поведение на границах областей захвата и удержания синхронного режима, приведены зависимости ширины полос захвата и удержания от силы связи между наногенераторами.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.07.45878.16985

Прохождение постоянного электрического тока через многослойную металлическую структуру, состоящую из чередующихся ферромагнитных и немагнитных слоев, может приводить к генерации СВЧ-колебаний в широком диапазоне частот [1]. На основе подобных структур реализуются спиновые наногенераторы, практическое применение которых в настоящее время проблематично из-за высокого уровня фазовых шумов и малой мощности. Взаимная синхронизация нескольких наногенераторов позволяет устранить указанные недостатки и приводит к подавлению шумов и когерентному сложению мощностей генерируемых сигналов.

Ранее в [2] рассмотрены вопросы синхронизации колебаний наногенератора внешним сигналом. Настоящая работа продолжает начатые исследования, в ней рассматриваются вопросы взаимной синхронизации двух наногенераторов, каждый из которых представляет собой точечный контакт, расположенный на общем проводящем слое гетерогенной структуры. При пропускании постоянного электрического тока через оба контакта в одном из слоев, называемом свободным, происходит возбуждение стоячей автоволны. Так как частота генерации зависит от плотности электрического тока, геометрии слоев и точечного контакта, спиновая волна будет образована двумя модами с собственными частотами ω_1 и ω_2.

Динамика каждой моды описывается уравнением для комплексной амплитуды моды [3]

$$\begin{aligned}\frac{dc_1}{dt} &= -j\omega_1 c_1 - (\eta_1 - \beta_1 J_1)c_1 - jT_1\alpha_1 n_1 c_1 - \frac{3\beta_1 J_1}{2SN}(u_1^2 + v_1^2)n_1 c_1 \\ &- j\,\frac{2}{3}\,T_1\lambda^2(\delta_1 n_2 c_1 + \delta c_1^* c_2 c_2) - \frac{\beta_1 J_1}{SN}\lambda^2\big[2(u_2^2 + v_2^2)n_2 c_1 + u_2^2 c_1^* c_2 c_2\big],\end{aligned} \tag{1}$$

где c_1 — комплексная амплитуда моды спиновой волны, возбуждаемой первым наногенератором, ω_1 — ее собственная частота, η_1 — скорость релаксации, β_1 — параметр, характеризующий эффект переноса спина, J_1 — плотность электрического тока, λ — параметр связи в интервале [0,1], j — мнимая единица. Значение и смысл остальных параметров приведены в [3]. Уравнение для второй моды получается взаимной заменой индексов 1 и 2.

Система (1) определена в четырехмерном фазовом пространстве $U = \{\mathrm{Re}\, c_1, \mathrm{Im}\, c_1, \mathrm{Re}\, c_2, \mathrm{Im}\, c_2\}$. Анализ фазовых траекторий в пространстве U выявил возможность существования аттракторов двух типов: предельные циклы и инвариантные торы. Если компоненты c_1 и c_2 не обращаются в нуль, то предельный цикл является образом синхронного режима, когда мгновенные частоты мод равны; инвариантный тор соответствует режиму биений, когда мгновенные частоты мод не равны. Если действительная и мнимая компоненты комплексной амплитуды c_i стационарного процесса равны нулю, то такой режим будем называть режимом подавления моды i-го генератора. Изучение предельных циклов и инвариантных торов в фазовом пространстве U является довольно сложной задачей. Исследование динамики спиновых волн можно существенно упростить, если для описания спиновых волн использовать фазовые уравнения, которые получаются из уравнений (1) с помощью замены $c_i = \rho_i \exp(j\varphi_i)$, где ρ_i — действительная амплитуда, а φ_i — фаза первой моды спиновой волны. Переходя к разности фаз $\theta = \varphi_2 - \varphi_1$, получаем систему фазовых уравнений, эквивалентную системе (1):

$$\begin{cases} \dfrac{d\rho_1}{d\tau} = -(a_2 + a_3\rho_1^2)\rho_1 - \lambda^2\rho_2^2\rho_1(a_{21} - a_{12}\sin\theta + a_{22}\cos\theta), \\ \dfrac{d\rho_2}{d\tau} = -(b_2 + b_3\rho_2^2)\rho_2 - \lambda^2\rho_1^2\rho_2(b_{21} + b_{12}\sin\theta + b_{22}\cos\theta), \\ \dfrac{1}{2}\dfrac{d\theta}{d\tau} = (-\gamma - b_1\rho_2^2 + a_1\rho_1^2) - \lambda^2\rho_1^2(b_{11} + b_{12}\cos\theta - b_{22}\sin\theta) \\ \qquad + \lambda^2\rho_2^2(a_{11} + a_{12}\cos\theta - a_{22}\sin\theta). \end{cases} \tag{2}$$

Здесь $\tau = t\omega_1$ — безразмерное время, $\theta = \varphi_2 - \varphi_1$ — мгновенная разность фаз колебаний двух мод, $\gamma = (\omega_2/\omega_1 - 1)$ — относительная частотная расстройка, параметры $a_1 = -1.0147$, $a_2 = -0.0372$, $a_3 = 0.4751$, $a_{11} = -1.3570$, $a_{12} = -0.6777$, $a_{21} = 0.6119$, $a_{22} = 0.2087$, $b_1 = -1.022$, $b_2 = -0.0447$, $b_3 = 0.4983$, $b_{11} = -1.5636$, $b_{12} = 0.4347$, $b_{21} = 0.6757$, $b_{22} = 0.2285$ вычислены на основе физических параметров натурного эксперимента [3].

Модель (2) определена в цилиндрическом фазовом пространстве $U_1 = \{\theta(\mathrm{mod}\, 2\pi), \rho_1, \rho_2\}$, где режиму синхронизации соответствует состояние равновесия, режиму биений — вращательный предельный цикл (цикл, охватывающий фазовый цилиндр U_1). Кроме того, в фазовом пространстве U_1 могут существовать колебательные предельные циклы, которые являются образом квазисинхронного режима, в котором частоты мод равны в среднем за период колебаний. Заметим, что в фазовом пространстве U_1 квазисинхронному режиму, как и режиму биений, отвечает инвариантный тор. Разделение инвариантных торов на образы квазисинхронного режима и режима биений — крайне затратная вычислительная процедура, связанная с анализом периодов квазипериодических решений на торе.

Отметим, что переход к фазовым уравнениям для изучения синхронизации связанных наногенераторов с помощью спиновых волн применялся, например, в [4], однако в этой работе использована модель линейной связи мод в отличие от модели, рассматриваемой здесь, в которой взаимодействие мод учитывается нелинейным образом как результат четырехволнового взаимодействия магнонов.

На рис. 1, *a* представлено разбиение плоскости параметров модели (2) на области существования режимов: D_s — синхронизации, D_k — квазисинхронизации, D_b — биений, D_{10} и D_{01} — подавления мод первого и второго генераторов. Существует три области синхронизации: левая, правая и центральная.

Центральная область D_s примыкает к точке N_0 $(0.0138763, 0)$ и является наиболее крупной. С увеличением λ полоса синхронизации сначала расширяется, достигает максимума на уровне $\lambda = 0.6$, далее сужается. Эту область ограничивают сплошные линии бифуркационных кривых: двукратного равновесия (расположенные ниже точек N_1 и N_3), Андронова–Хопфа (между точками N_1, N_2 и N_3, N_4), трехкратного равновесия (участки кривых выше точек N_2 и N_4) [5]. Отметим, что бифуркация Андронова–Хопфа является жесткой; следовательно, соответствующие ей участки границ области синхронизации являются опасными [6]. При выходе из области D_s через правую границу ниже точки N_2 и через левую границу ниже точки N_4 устанавливается режим биений. Границы области захвата в синхронный режим показаны штриховыми линиями, области совместного существования синхронного режима и режима биений отмечены штриховкой. Выход из области синхронизации вправо выше точки N_2 и влево выше N_4 связан с подавлением мод второго и первого генераторов соответственно. Области биений и подавления колебаний разделяют штрихпунктирные бифуркационные прямые, проходящие через точки N_2 (0.0539385, 0.815932) и N_4 $(-0.0369919,\ 0.919174)$, соответствующие касательной бифуркации вращательных предельных циклов.

Структуры левой и правой областей синхронизации, примыкающих к ним областей квазисинхронизации и областей биений аналогичны. Фрагмент плоскости параметров с левой областью синхронизации приведен на рис. 1, *b*. Здесь области расходятся из точки N_5 $(-0.0322808,\ 0.815932)$, при этом крайняя левая область — область синхронизации, средняя — квазисинхронизации, правая — биений. Левой границей области D_s синхронизации служит бифуркационная

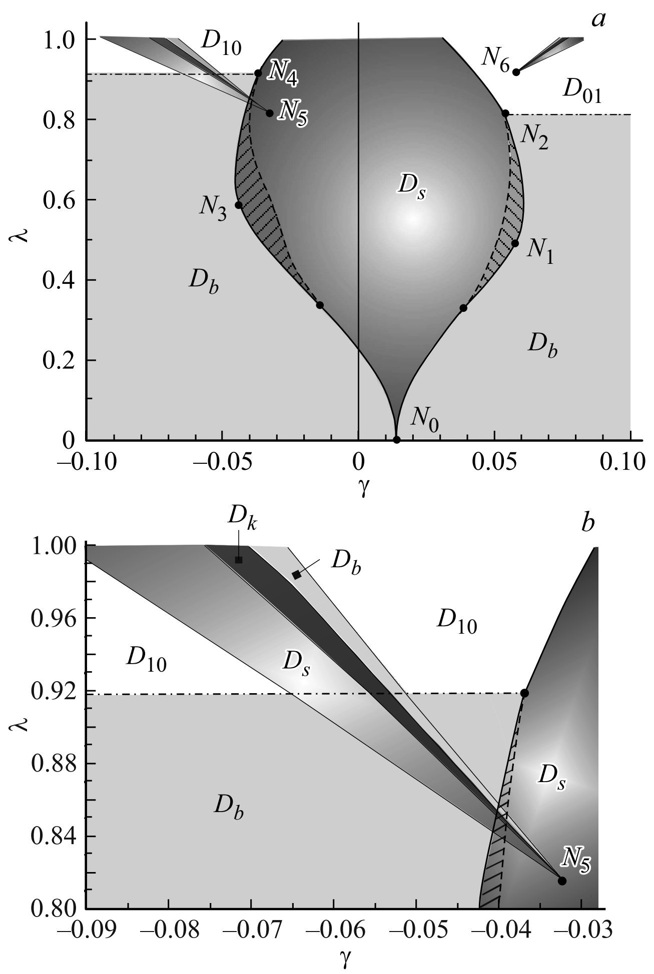

Рис. 1. Структура (a) и фрагмент (b) плоскости параметров модели (2). D_s — область синхронизации, D_k — область квазисинхронизации, D_b — область биений, D_{10} и D_{01} — подавления мод первого и второго генераторов.

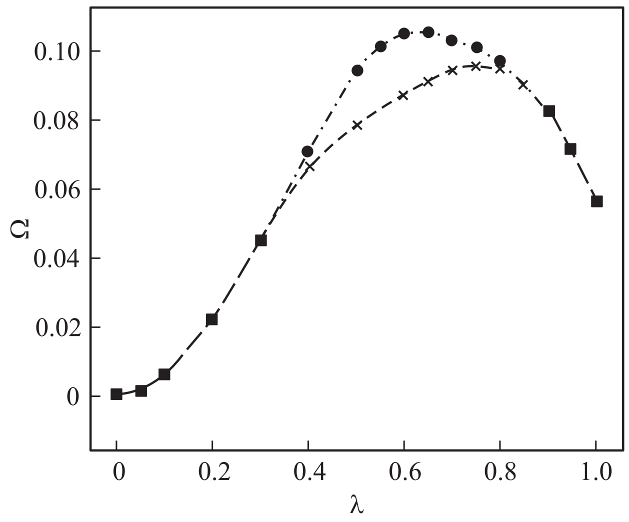

Рис. 2. Зависимость ширины полос захвата и удержания от величины параметра связи λ, рассчитанная по центральной области D_s. Штриховая линия — ширина полосы захвата, штрихпунктирная — ширина полосы удержания.

кривая трехкратного состояния равновесия, области D_s и D_k разделяет кривая мягкой бифуркации Андронова–Хопфа, области D_k и D_b — кривая гомоклинических траекторий. Примечательно, что точка N_5 принадлежит центральной области синхронизации, поэтому области D_s, D_k и D_b пересекаются с центральной областью синхронизации, порождая большое разнообразие картин мультистабильного поведения, в частности одновременное существование двух синхронных режимов, синхронного и квазисинхронного режимов, двух режимов биений и синхронного режимов.

Области D_s, D_k и D_b правой структуры расходятся из точки N_6 (0.0576322, 0.919174), при этом область D_s расположена справа, D_b — слева, D_k — в центре. Точка N_6 не принадлежит центральной области, поэтому зоны мультистабильного поведения правой структурой не порождаются.

Используя данные о расположении границ областей бистабильности и синхронизации, можно оценить зависимость ширины полос захвата и удержания от величины параметра связи λ. Эта зависимость представлена на рис. 2. Ширина полосы Ω вычисляется как разность максимальных и минимальных значений частотной расстройки γ на соответствующих границах областей при фиксированном значении параметра связи. На основании зависимости $\Omega(\lambda)$ можно вычислить значение параметра связи, при котором ширина полосы захвата будет максимальной: $\lambda_{\max} = 0.75$.

В работе рассмотрены вопросы взаимной синхронизации двух спиновых наногенераторов, связанных через спиновые волны. Исследование проведено путем качественно-численного анализа динамической модели, определенной в цилиндрическом фазовом пространстве. Установлено соответствие между фазовыми траекториями модели и динамическими режимами связанных генераторов: синхронным, квазисинхронным, биений и подавления колебаний генераторов. Получено разбиение пространства параметров модели на области существования, различающиеся динамическим поведением, выделены области мультистабильного поведения. Исследовано поведение на границах областей захвата и удержания синхронного режима, приведены зависимости ширины полос захвата и удержания от силы связи между наногенераторами. В отличие от модели синхронизации внешним источником спиновых волн [2] обнаружены области существования квазисинхронного режима. Кроме того, появление взаимной связи приводит к возникновению побочных областей синхронизации внутри области биений.

Список литературы

[1] *Slonczewski J.C.* // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 159. N 1. P. L1–L7.
[2] *Алешин К.Н., Матросов В.В., Мишагин К.Г* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 6. С. 8–14.
[3] *Rezende S.M., de Aguiar F.M., Rodriguez-Suarez R.L., Azevedo A.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. N 8. P. 087202.
[4] *Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V.* // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2014. V. 67. N 2. P. 20601.
[5] *Анищенко В.С.* Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990. 312 с.
[6] *Баутин Н.Н.* Поведение динамических систем вблизи границ области устойчивости. М.: Наука, 1984. 176 с.