

# Моделирование влияния намагниченности насыщения магнитной пленки на характеристики магنونного резервуарного компьютера

А.В. Кондрашов<sup>1</sup>, А.А. Никитин<sup>1</sup>, М.П. Костылев<sup>2</sup>, А.Б. Устинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>University of Western Australia

**Аннотация:** проведено исследование влияния намагниченности насыщения магнитной пленки на вычислительные способности магنونного резервуарного компьютера. Результат исследования показывает, что параметры магنونного резервуара сильно зависят от намагниченности насыщения. Наиболее сильные колебания емкостей ТКП и ТКЧ связаны с тем, что при некоторых значениях намагниченности насыщения соотношение длительности входных импульсов и времени задержки в кольце становятся кратны.

**Ключевые слова:** резервуарный компьютер, магنونика, спиновые волны, нейроморфные вычисления

## 1. Введение

Резервуарные компьютеры (РК) являются одним из способов физической реализации рекуррентных нейронных сетей. Благодаря наличию памяти, РК могут быть с успехом использованы для решения задач классификации, таких как распознавание речи или определения формы сигнала, а также предсказания динамики нелинейных систем, в том числе динамического хаоса [1-5]. Главным достоинством резервуарных компьютеров является простота и скорость обучения, так как необходимо определить весовые коэффициенты только выходного слоя, что не снижает эффективности работы системы [5]. Основой РК является «резервуар» - некоторая физическая динамическая система, обладающая «затухающей» памятью и демонстрирующая нелинейный отклик на входное воздействие.

Одним из методов создания резервуара, обладающего всеми необходимыми свойствами, является использование различных физических явлений, возникающих в тонких ферромагнитных пленках [6-13]. В недавней работе [12, 13] численное моделирование резервуарного компьютера на основе магنونного активного кольцевого осциллятора (МАКО) показало, что аккуратный подбор параметров резервуара может значительно улучшить вычислительные способности такого РК.

Вместе с тем, хорошо известно, что параметры ферромагнитных пленок сильно зависят от температуры. Основное влияние температура оказывает на намагниченность насыщения. Так, например, намагниченность насыщения снижается при увеличении температуры. Это в свою очередь приводит к изменению дисперсионных свойств спиновых волн, распространяющихся в пленке. Такие изменения потенциально могут повлиять на параметры кольцевого осциллятора и резервуарного компьютера на его основе.

Целью настоящей работы является исследование влияния намагниченности насыщения ферромагнитной пленки на параметры магنونного резервуарного компьютера на основе магنونного активного кольцевого осциллятора.

## 2. Описание модели и результатов моделирования

Численная модель резервуарного компьютера на основе МАКО подробно описана в работе [12]. Основным элементом осциллятора является спин-волновая линия

задержки (СВЛЗ), которая представляет собой ферритовую пленку, размещенную на антеннах спиновых волн. Выход СВЛЗ соединится с ее входом через цепь обратной связи, состоящую из усилителя, направленного ответвителя и переменного аттенюатора. Поверхностные спиновые волны, распространяющиеся в ферритовой пленке, обеспечивают нелинейность и память, необходимые для работы резервуара. Усилитель компенсирует потери для перевода кольца в режим монохроматической генерации СВЧ сигнала. Электронный аттенюатор служит для ввода данных в кольцо путем регулировки коэффициента ослабления. Направленный ответвитель выделяет часть циркулирующего в кольце сигнала для дальнейшего анализа.

Параметры спин-волнового кольцевого генератора, использованные для моделирования, были следующими: толщина пленки  $L = 5.65$  мкм, полуширина линии ферромагнитного резонанса  $\Delta H = 0.5$  Э, нелинейный декремент затухания пятого порядка  $\eta_2 = 2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ , нелинейный декремент затухания третьего порядка  $\eta_1 = 2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ , расстояние между антеннами  $l = 8$  мм, потери при возбуждении и приеме спиновых волн  $H_{in} = H_{out} = 0.5$ , коэффициент ответвления направленного ответвителя  $\kappa = 0.1$ .

Моделирование проводилось для пленок с намагниченностями насыщения 1200 Гс, 1500 Гс, 1780 Гс, 1990 Гс. Для каждой пленки значения магнитных полей подмагничивания выбирались так, чтобы частота несущей спиновой волны была равна  $f_{св} = 7.28$  ГГц для всех 4 образцов пленок. Напряженности соответственно равнялись 2065.2 Э, 1951 Э, 1851 Э и 1780 Э. В ходе моделирования для каждой пленки также исследовалось влияние небольшого изменения намагниченности насыщения на характеристики резервуара. Отметим, что такие изменения могут быть вызваны, например, нагревом магнитной пленки. Диапазон, в котором изменялась намагниченность насыщения, задавался из условия, что изменение намагниченности приводит к изменению частоты несущей спиновой волны в диапазоне 7.05-7.33 ГГц для всех четырех образцов магнитных пленок.

Для оценки вычислительной мощности магнетонного резервуарного компьютера использовались два стандартных теста: тест кратковременной памяти (ТКП) и тест контроля четности (ТКЧ). В ходе ТКП ПК обучается по текущему состоянию системы восстанавливать ранее введенные значения битов. Результаты тестирования определяются только величиной памяти резервуара. При выполнении ТКЧ система обучается рассчитывать четность суммы ранее введенной последовательности битов.

В численном эксперименте входной сигнал представлял собой битовую последовательность, состоящую из 4200 битов. Параметры проведенных тестов были следующими: число бит, вводимых для перевода резервуара в "стационарное" состояние - 200, число бит использовавшихся для обучения - 2000, число бит использовавшихся для тестирования - 2000.

Значения коэффициента затухания электронного аттенюатора задавались бинарными значениями «0» и «1». Отсутствие потерь в аттенюаторе соответствовало логическому нулю. Единице соответствовало некоторое ненулевое значение коэффициента затухания аттенюатора. Переключение между «0» и «1» приводило к резкому уменьшению коэффициента усиления кольца и переходу резервуара из стационарного состояния с высокой амплитудой генерируемого СВЧ-сигнала в стационарное состояние с низкой амплитудой и наоборот.

При проведении моделирования длительность битов была равно  $T_p = 1935$  нс. Выходной сигнал представлял собой временную реализацию, форма которой определялась изменением коэффициента усиления кольца. Значения коэффициентов усиления кольца для логического нуля и логической единицы составляли 1.2 и 1.13, соответственно.

Снижение намагниченности насыщения смещало дисперсионную характеристику. Поскольку значение волнового вектора было задано условием кратности фазового

набега  $2\pi$ , то сдвиг дисперсионной характеристики приводил к уменьшению частоты генерации и уменьшению групповой скорости. Время задержки в кольце росло и росла потеря.

Расчитанные в результате моделирования зависимости имели сложный характер, но обладали рядом общих черт. На рисунке 1(а) показаны зависимости емкостей ТКП и ТКЧ для пленки с намагниченностью насыщения 1500 Гс. Небольшие изменения намагниченности приводили к изменению емкости ТКП в диапазоне от 2 до 8, а ТКЧ – от 1 до 2.8. График демонстрирует несколько глубоких провалов емкости ТКП. Этим провалам соответствуют пики на графиках ТКЧ.

Результаты моделирования таких же зависимостей для других образцов магнитных пленок показаны на рисунке 1 (в,г). Для удобства объяснения физических причин возникающий изменений графики построены в пересчете на время распространения сигнала в кольце  $\tau_{ring}$  и отношения длительности одиночного входного импульса к времени распространения сигнала в кольце. По рисунку можно видеть, что провалы емкости ТКП и пики емкости ТКЧ характерны и другим пленкам. Наиболее сильные колебания емкостей связаны с тем, что при этом значении намагниченности насыщения соотношение длительности входных импульсов и времени задержки в кольце становятся кратны. Провалы возникают не только при целочисленном соотношении, но и для ряда дробных соотношений (#.125, #.25, #.375, #.5, #.625, #.75, #.875, где # - любая цифра). Такое поведение связано с возникновением синхронизации между входными последовательностями и сигналом, циркулирующим по кольцу. Возникновение синхронизации между входным сигналом и динамическими процессами в резервуаре приводит к резкому снижению его емкости [14].

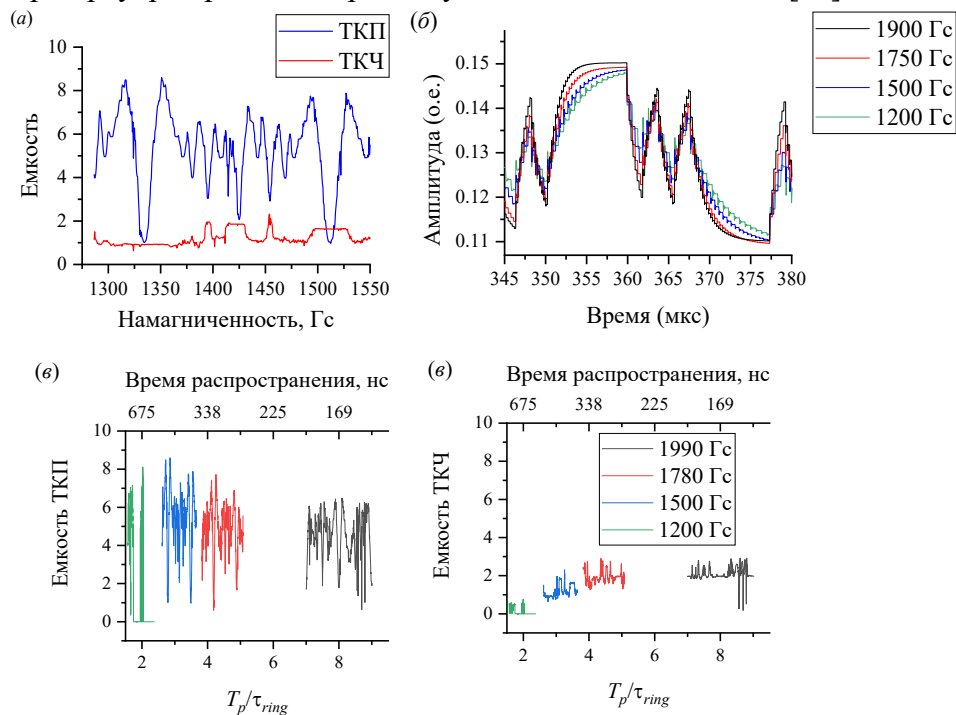


Рисунок 1 – График зависимости емкостей ТКП и ТКЧ от намагниченности насыщения (а), влияние намагниченности насыщения на форму выходных временных реализаций (б), влияние изменения времени распространения сигнала по кольцу при изменении намагниченности насыщения на емкости ТКП (в) и ТКЧ (г) для разных пленок.

Использование пленок с большей исходной намагниченностью насыщения приводит к снижению емкости ТКП и росту емкости ТКЧ. Это связано с влиянием намагниченности насыщения на форму выходных временных реализаций. Для

пояснения можно рассмотреть, как влияет намагниченность на форму отклика резервуара (см. рисунок 1(б)). Для сопоставления были выбраны значения намагниченностей насыщения, соответствующие локальным максимумам зависимостей вблизи провалов.

Как было сказано выше, увеличение намагниченности насыщения приводит к увеличению групповой скорости ПСВ и уменьшению времени распространения сигнала в кольце. Такие изменения приводят к тому, что переходные процессы в кольце проходят быстрее, т.е. осциллятору требуется меньше времени для перехода в стационарное состояние. После перехода в стационарное состояние динамика системы перестает зависеть от ранее введенных данных. Таким образом время переходного процесса ограничивает память резервуара. Поэтому память резервуаров на основе пленок с большей намагниченностью насыщения заметно меньше, что в свою очередь снижает ТКП. Вместе с тем, быстрый переход в стационарное состояние характеризуется большей нелинейностью этого перехода, поэтому при больших намагниченностях насыщения ёмкость ТКЧ становилась больше.

### 3. Заключение

Проведенное численное моделирование показало, что изменение намагниченности насыщения ферромагнитной пленки, например, при ее нагреве или охлаждении приводит к сильному изменению вычислительной способности магнетонного резервуарного. В первую очередь это связано с ростом времени распространения сигнала в спин-волновом кольцевом генераторе при уменьшении намагниченности насыщения. Большое время распространения обеспечивает большую память резервуара. Однако большая память приводит к уменьшению нелинейности системы и снижению емкости ТКЧ. Провалы на зависимостях емкости от намагниченности насыщения характеризуются синхронизацией динамических процессов в кольце с входным сигналом.

Работа в СПбГЭТУ выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках «Мегагранта» (соглашение № 075-15-2021-609).

#### Список литературы

1. Tanaka G. et al. Recent advances in physical reservoir computing: A review //Neural Networks. – 2019. – Т. 115. – С. 100-123.
2. Jaeger H. et al. Optimization and applications of echo state networks with leaky-integrator neurons //Neural networks. – 2007. – Т. 20. – №. 3. – С. 335-352.
3. Jaeger H., Haas H. Harnessing nonlinearity: Predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication //science. – 2004.
4. Pathak J. et al. Model-free prediction of large spatiotemporally chaotic systems from data: A reservoir computing approach //Physical review letters. – 2018. – Т. 120. – №. 2. – С. 024102.
5. Kohei N., and Fischer I. Reservoir computing // Singapore: Springer. – 2021.
6. Jiang W. et al. Physical reservoir computing using magnetic skyrmion memristor and spin torque nanooscillator //Applied Physics Letters. – 2019. – Т. 115. – №. 19. – С. 192403.
7. Nakane R., Tanaka G., Hirose A. Reservoir computing with spin waves excited in a garnet film //IEEE access. – 2018. – Т. 6. – С. 4462-4469.
8. Papp A., Csaba G., Porod W. Characterization of nonlinear spin-wave interference by reservoir-computing metrics //Applied Physics Letters. – 2021. – Т. 119. – №. 11. – С. 112403.
9. Watt S., Kostylev M. Reservoir computing using a spin-wave delay-line active-ring resonator based on yttrium-iron-garnet film //Physical Review Applied. – 2020. – Т. 13. – №. 3. – С. 034057.
10. Watt S., Kostylev M., Ustinov A. B. Enhancing computational performance of a spin-wave reservoir computer with input synchronization //Journal of Applied Physics. – 2021. – Т. 129. – №. 4. – С. 044902.
11. Watt S. et al. Implementing a magnonic reservoir computer model based on time-delay multiplexing //Physical Review Applied. – 2021. – Т. 15. – №. 6. – С. 064060.

12. Nikitin A. A. et al. Theoretical model for nonlinear spin-wave transient processes in active-ring oscillators with variable gain and its application for magnonic reservoir computing //Journal of Applied Physics. – 2022. – T. 131. – №. 11. – C. 113903.
13. Kondrashov A. V., Nikitin A. A., Nikitin A.A., Kostylev M., and Ustinov A.B. Numerical simulation of performance of magnonic reservoir computer based on active-ring oscillator. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022 – T. 563. – C. 169968.
14. Toyozumi T. Nearly extensive sequential memory lifetime achieved by coupled nonlinear neurons //Neural computation. – 2012. – T. 24. – №. 10. – C. 2678-2699.