

УДК 537.622.4

DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-1-81-86

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ. СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ ОГРАНИЧЕННОЙ ГЕОМЕТРИИ

© А.Р. Минибаева, З.В. Гареева

Обсуждаются перспективы использования магнитных наноструктур в качестве элементов нейронных сетей. В настоящее время нейросетевые программы обучения активно используются для анализа и обработки больших массивов данных, однако вопрос о разработке компьютерных технологий, работающих по принципу работы нейросети до сих пор остается открытым. Возможности использования магнитных элементов в качестве физических носителей битов информации в данных устройствах привлекают большое внимание исследователей и технологов, что связано с наличием нескольких управляемых параметров (параметров порядка) в магнитной системе, возможностями уменьшения размеров магнитных элементов за счет использования магнитных наноструктур (доменных границ, вихрей, скирмионов), сверхбыстрого переключения магнитного состояния и рядом других факторов. В связи с этим одним из ключевых аспектов исследований является определение основных контролируемых магнитных параметров в системах ограниченной геометрии и выявление способов управления данными параметрами за счет внутренних и внешних воздействий. Проведено исследование основного магнитного состояния в системе ограниченной геометрии; исследована перестройка магнитного состояния системы при изменении внешних факторов (приложенного магнитного поля, размеров образца), а также внутренних параметров системы: константы магнитной анизотропии, константы взаимодействия Дзялошинского–Мория, расчеты проведены в рамках микромагнитного моделирования с использованием пакета The Object Oriented MicroMagnetic Framework (ООММФ). Результаты исследования показывают, что анизотропное обменное взаимодействие (взаимодействие Дзялошинского–Мория) оказывает существенное влияние на магнитное состояние системы ограниченной геометрии, а именно, при изменении величины константы Дзялошинского–Мория в системах с одноосной магнитной анизотропией наблюдается серия фазовых переходов между магнитными состояниями разных типов: переходы из однородного магнитного состояния в вихревое состояние скирмионного типа, реализация системы скирмионных состояний (доменной структуры с однодоменным состоянием скирмионного типа) с последующим разворотом и перестройкой доменной структуры при изменении величины константы Дзялошинского–Мория. В случае магнитной анизотропии типа «легкая ось» киральность и свойства рассмотренных структур не зависят от знака константы взаимодействия Дзялошинского–Мория.

Ключевые слова: магнитные наноструктуры, взаимодействие Дзялошинского–Мория, нейронные сети, магнитные вихри, скирмионы.

Введение. Магнитные материалы активно используются при разработке спинтронных устройств, устройств хранения и обработки информации. Энергонезависимость магнитных носителей информации, обеспечивающих хранение данных при отсутствии внешних воздействий, делает их привлекательными для использования в устройствах магнитной памяти произвольного доступа (MRAM). Магнитные элементы являются активными компонентами логических устройств: возможность уменьшения магнитного

носителя бита информации до наноразмеров; реализации сверхбыстрого переключения магнитного состояния в тера- (10^{12} Гц), пета- (10^{15} Гц) и эксагерцовом (10^{18} Гц) диапазонах открывает широкие перспективы использования магнитных элементов в современных технологических устройствах.

В последние годы активно разрабатываются новые концепции компьютерных технологий, включая квантовый компьютеринг, программы машинного обучения и нейросетевые техно-

МИНИБАЕВА Альбина Рафиковна, Башкирский государственный университет,

e-mail: minibaeva1999@bk.ru

ГАРЕЕВА Зухра Владимировна – д.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,

e-mail: gzv@anrb.ru

логии. Нейросетевые программы обучения успешно используются для анализа и обработки больших массивов данных (big data), однако вопрос о разработке компьютерных технологий, работающих по принципу работы нейросети до сих пор остается открытым.

В качестве основных элементов нейросетевого компьютера предполагается использовать магнитные элементы, которые должны удовлетворять определенным требованиям, а именно, иметь наноразмеры, управляемый параметр порядка, т.е. в случае магнитной среды – иметь упорядоченную магнитную структуру, способную перестраиваться под влиянием внешних воздействий, что обеспечит возможность контроля параметра порядка за счет внешних факторов, управляющих нейросетью. В перспективе требуется оценка возможностей согласованной работы нескольких элементов, организованных по принципу нейросети, однако на начальном этапе необходимо провести исследования магнитных свойств отдельного магнитного наноэлемента.

Цель данной работы состоит в том, чтобы познакомить читателей с основными концепциями машинного обучения и организации нейросетевых структур, определить роль магнитной составляющей в данной системе, провести расчет основных магнитных состояний в системах ограниченной геометрии (наноточке), исследовать переключение магнитного состояния и перестройку магнитной структуры при изменении внешних и внутренних параметров системы.

Машинное обучение, нейронные сети.

Машинное обучение – класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение в процессе применения решений множества сходных задач. Для построения таких методов используются средства математической статистики, численных методов, методов оптимизации, теории вероятностей, теории графов, различные техники работы с данными в цифровой форме.

Различают два типа обучения:

1) Обучение по прецедентам или индуктивное обучение основано на выявлении эмпирических закономерностей в данных.

2) Дедуктивное обучение предполагает формализацию знаний экспертов и их перенос в компьютер в виде базы знаний.

Машинное обучение – это построение на основании известных данных моделей, которые предсказывают неизвестное.

Основные задачи машинного обучения:

– регрессия (предсказание числовых значений признаков, например, предсказание будущих объемов продаж на основании известных данных о продажах в прошлом);

– классификация (предсказание того, к какому из известных классов относится объект, например, предсказание того, вернет ли заемщик кредит, на основании данных о том, как возвращали кредиты заемщики в прошлом);

– кластеризация (разделение большого множества объектов на кластеры – классы, внутри которых объекты похожи между собой, например, сегментирование рынка, разделение всех потребителей на классы так, что внутри классов потребители похожи между собой, а в разных классах – отличаются);

– поиск аномалий (поиск редких и необычных объектов, существенно отличающихся от основной массы, например, поиск мошеннических транзакций).

Нейронные сети (рис. 1) являются одним из видов машинного обучения [1]. Это математическая модель, а также ее программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Важнейшим свойством нейросетей является их способность обучаться на основе априорной информации (фактов), наблюдений, измерений (примеров). Под обучением понимается процесс, в котором параметры ИНС (весовые коэффициенты связей между нейронами, пороговые уровни и др.) в соответствии с тем или иным алгоритмом настраиваются при предъявлении обучающей выборки. Обучающая выборка представляет информацию об исследуемом объекте, процессе или явлении и содержит как пары входных, и соответствующих им выходных значений (X, Y), так и лишь входные значения X . В результате обработки такой выборки нейронная сеть, в соответствии с заданным алгоритмом, корректирует весовые коэффициенты синаптических связей или другие параметры для того, чтобы обеспечивать требуемую реакцию Y на входные образы X .

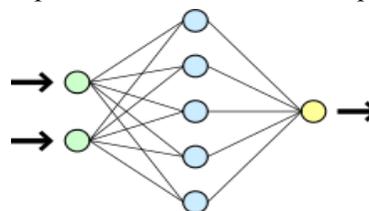


Рис. 1. Схематическое изображение нейронной сети

После разработки алгоритмов обучения получаемые модели стали использовать в практических целях: в задачах прогнозирования, для распознавания образов, в задачах управления и др. С точки зрения машинного обучения, нейронная сеть представляет собой частный случай методов распознавания образов, дискриминантного анализа, методов кластеризации и т.п. НС представляет собой систему соединенных и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов). Такие процессоры обычно довольно просты (особенно в сравнении с процессорами, используемыми в персональных компьютерах). Каждый процессор подобной сети имеет дело только с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые он периодически посылает другим процессорам. И, тем не менее, будучи соединенными в достаточно большую сеть с управляемым взаимодействием, такие по отдельности простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи. Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных.

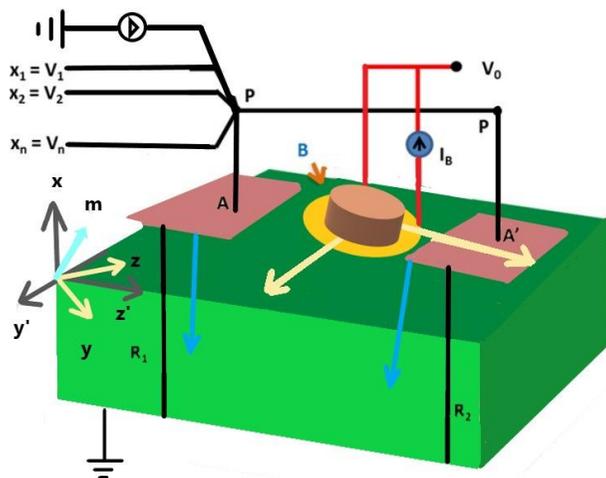


Рис. 2. Схема стрейнотронного спин-нейрона, реализующего ступенчатую передаточную функцию [2]

В искусственных нейронных сетях нейроны обычно реализуются с помощью высокодиссипативных операционных усилителей на основе КМОП. Более энергоэффективной реализацией является «спин-нейрон», реализованный с помощью магнито-туннельного перехода (МТП), который переключается со спинполяризованным током (представляющим собой взвешенную сумму входных токов), который либо обеспечивает крутящий момент передачи спина, либо индуцирует движение доменной стенки в мягком слое МТП, чтобы имитировать запуск нейрона (рис. 2) [2].

Основными элементами нейронных сетей являются мемристоры, микроэлектронные элементы, которые могут изменять свое сопротивление в зависимости от величины тока, который проходил через них до этого, они обладают «памятью», поэтому могут быть использованы в качестве запоминающих устройств или микрочипов, востребованных в областях микроэлектроники, где требуется функция памяти, в машинном обучении и анализе больших и/или сложных массивов данных.

Магнитные состояния в системе ограниченной геометрии. В последние годы большое внимание уделяется магнитным вихревым и скирмионным структурам, которые также рассматриваются в качестве прототипов нейронов, в публикациях [3, 4] предложены схемы нейросетевых технологий, в основе которых лежат скирмионные состояния. Магнитные вихревые состояния реализуются в системах ограниченной геометрии при оптимальном соотношении физических и геометрических параметров системы. Вихревые структуры имеют несколько параметров порядка – киральность, полярность, топологический заряд, которые чувствительны к внешним воздействиям и могут управляться синапсами в нейросети [3].

Иследуем магнитные состояния в системах ограниченной геометрии, используя методы аналитических расчетов и микромагнитного моделирования. Запишем энергию системы

$$F = A \left(\partial_{\mu} m_{\alpha} \right)^2 + F_{DMI} - K m_z^2 - \frac{1}{2} M_s \mathbf{m} \cdot \mathbf{H}_m - M_s \mathbf{m} \cdot \mathbf{H}, \quad (1)$$

где A – константа обмена, K – константа магнитной анизотропии, M_s – намагниченность насыщения, \mathbf{H}_m – поля размагничивания, F_{DMI} –

энергия Дзялошинского–Мория, которая имеет следующий вид

$$F_{DMI} = D \cdot (\mathbf{m}_i \operatorname{div} \mathbf{m}_j - (\mathbf{m}_i \cdot \nabla) \mathbf{m}_j) \quad (2)$$

где D – константа взаимодействия Дзялошинского–Мория (ВДМ).

1) Рассмотрим процессы переключения намагниченности под действием внешнего магнитного поля при отсутствии ВДМ ($D=0$). Основные магнитные состояния: состояния вида «легкая ось» ($\theta=0$) при $K>0$, «легкая плоскость» ($\theta=\pi/2$) при $K<0$ находятся на основе минимизации энергии (1), здесь θ – полярный угол, определяющий положение вектора намагниченности в сферической системе координат с осью OZ , ориентированной по нормали к поверхности наноточки. Рассмотрим наноточку цилиндрической формы, учтем поля размагничивания, используя размагничивающий фактор и построим зависимости $\theta(H)$ при разных значениях намагниченности насыщения (рис. 3).

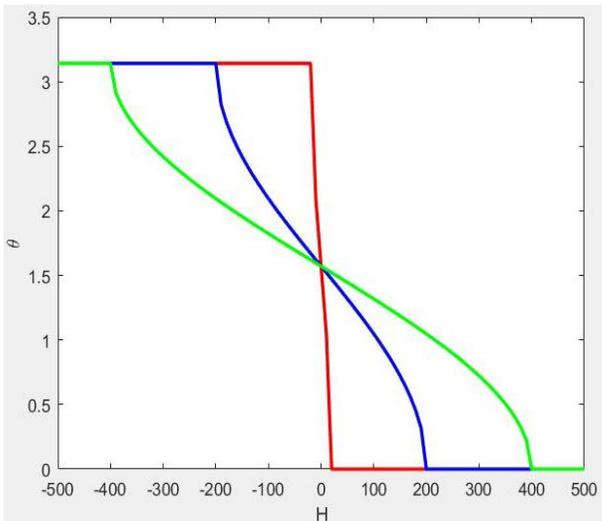


Рис. 3. График зависимости полярного угла θ , определяющего ориентацию вектора намагниченности в магнитной наноточке от магнитного поля H ($M=50$ Гс (красная линия), $M=100$ Гс (синяя линия), $M=1000$ Гс (зеленая линия))

На графиках видно, что переключение намагниченности под действием магнитного поля осуществляется безгистерезисным способом, т.е. без потерь энергии, что указывает на перспективность использования нанозадающих элементов в информационных устройствах; скорость переключения зависит от величины намагниченности насыщения.

2) В реальных системах необходимо учитывать размеры образца, поля размагничивания и другие взаимодействия в системе. Это позволяют сделать современные пакеты микромагнит-

ного моделирования и в дальнейшем мы перейдем к расчету основного магнитного состояния нанозадающего элемента с помощью пакета OOMMF [5]. Рассмотрим магнитную наноточку с поперечными размерами 200×200 nm и варьируемой толщиной $12 \text{ nm} < d < 120 \text{ nm}$, и следующими значениями параметров материала $M_s = 50$ Гс, $A = 2.9 \cdot 10^{-7}$ эрг/см, $K_u = 1 \cdot 10^4$ эрг/см³, $9 \cdot 10^7$ эрг/см² $< D < 9 \cdot 10^7$ эрг/см². Графики, иллюстрирующие распределение намагниченности в системе при изменении величины и направления вектора Дзялошинского D , показаны на рис. 4. На графиках видно, что при отсутствии ВДМ ($D=0$) стабилизируется магнитное состояние типа «легкая ось» ($\theta=0$), рассмотренное выше (см. 1). Учет ВДМ приводит к трансформации основного состояния $\theta=0$ в скирмионоподобные структуры $D = \pm 0.3$ мДж/м² (рис. 4, б), дальнейшее увеличение величины константы D приводит к формированию многодоменного состояния (рис. 4, с, д), причем основным состоянием отдельных доменов является скирмионоподобная конфигурация. Отметим, что в случае $K>0$ знак D не влияет на характер распределения намагниченности в системе. Таким образом, изменить магнитные состояния наноточки можно и без магнитного поля, например, с помощью взаимодействия Дзялошинского–Мория.

Резюмируя, магнитные наноточки могут служить перспективными элементами для использования в информационных технологиях: переключение магнитного состояния под действием магнитного поля в данных системах осуществляется с небольшими энергетическими затратами, перестройка магнитной структуры может быть реализована за счет изменения внешних и внутренних параметров. В системах ограниченной геометрии с сильным взаимодействием Дзялошинского–Мория, магнитное состояние определяется конкуренцией обменных и релятивистских взаимодействий. Проведенные расчеты показывают, что изменение параметров анизотропного обменного взаимодействия приводит к перестройке магнитной структуры, сопровождающейся серией фазовых переходов – переход из однородного магнитного состояния в вихревое состояние скирмионного типа, образование системы скирмионных состояний (доменной структуры с однодоменным состоянием скирмионного типа), разворот и дальнейшая перестройка доменной структуры, отметим, что в случае одноосной магнитной анизотропии, киральность и свойства рассмотренных структур не зависят от знака константы ВДМ.

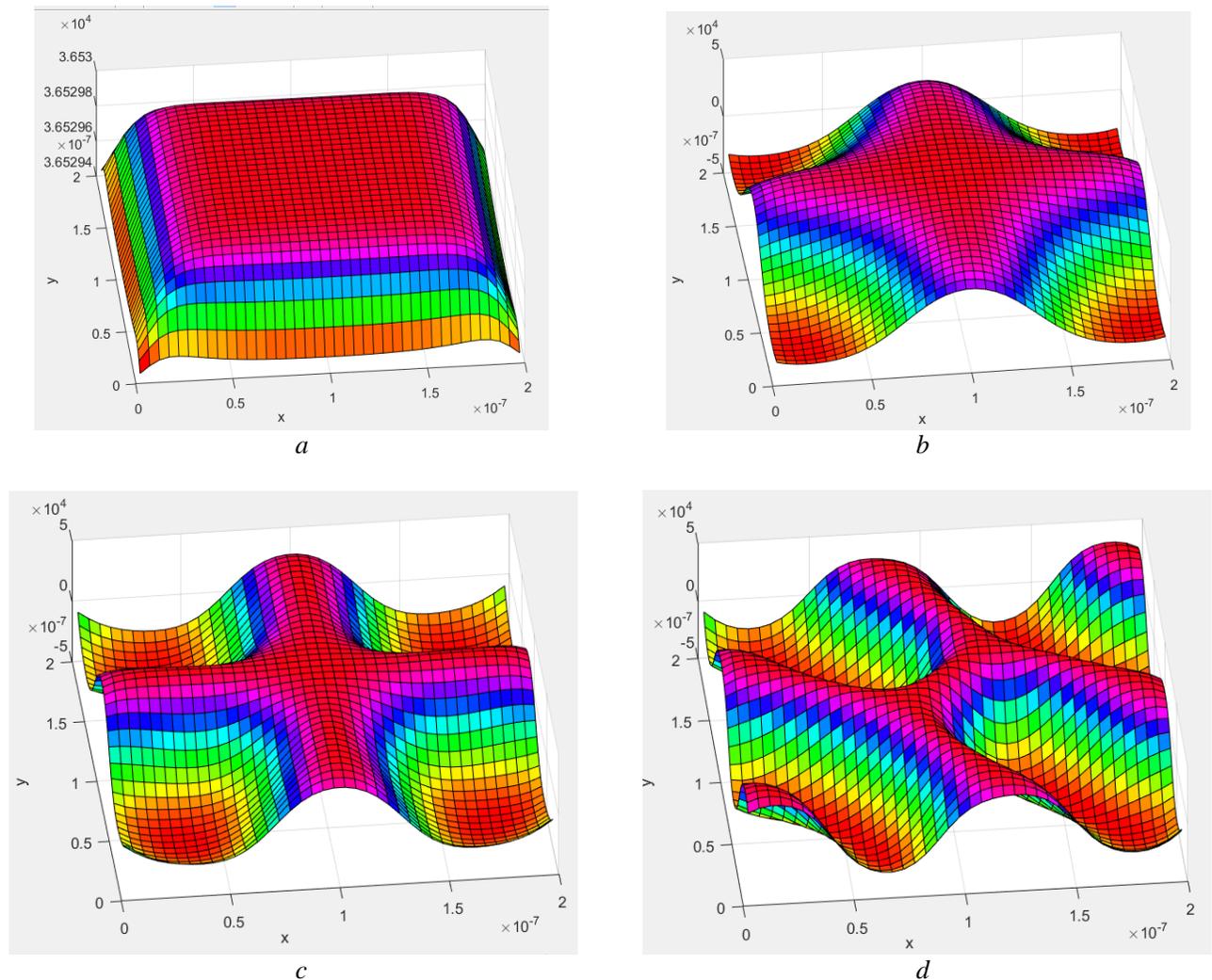


Рис. 4. Распределение намагниченности в наноточке при $K_u > 0$, $d = 30$ nm. a) $D = 0$, b) $D = \pm 0.2$ mJ/m², c) $D = \pm 0.3$ mJ/m², d) $D = \pm 0.4$ mJ/m². Красный цвет соответствует состоянию $\theta = 0$, синий цвет состоянию $\theta = \pi$

Литература

1. Барский А.Б. Логические нейронные сети: Учебное пособие. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. 352 с.
2. Biswas A. K., Atulasimha J., Bandyopadhyay S. The straintronic spin-neuron // *Nanotechnology*. 2015. V. 26, № 28. P. 285201.
3. Grollier J., Querlioz D., Camsari K.Y., Everschor-Sitte K., Fukami, S., Stiles M.D. 2020. Neuromorphic spintronics // *Nature Electronics*. V. 3, № 7. P. 360–370.
4. Prychynenko D., Sitte M., Litzius K., Krüger B., Bourianoff G., Kläui M., Sinova J., Everschor-Sitte K. Magnetic skyrmion as a nonlinear resistive element: A potential building block for reservoir computing // *Physical Review Applied*. 2018. V. 9 (1). P. 014034.
5. Rohart S., Thiaville A. Skyrmion confinement in ultrathin film nanostructures in the presence of Dzyaloshinskii-Moriya interaction // *Physical Review B*. 2013. V. 88 (18). P. 84422.

References

1. Barsky A.B. Logic neural networks. Uchebnoe posobie. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy, 2007. 352 p.
2. Biswas A. K., Atulasimha J., Bandyopadhyay S. The straintronic spin-neuron. *Nanotechnology*, 2015, vol. 26, no. 28, p. 285201.
3. Grollier J., Querlioz D., Camsari K.Y., Everschor-Sitte K., Fukami, S., Stiles M.D. Neuromorphic spintronics. *Nature Electronics*, 2020, vol. 3, no. 7, pp. 360–370.
4. Prychynenko D., Sitte M., Litzius K., Krüger B., Bourianoff G., Kläui M., Sinova J. Everschor-Sitte K. Magnetic skyrmion as a nonlinear resistive element: A potential building block for reservoir computing. *Physical Review Applied*, 2018, vol. 9 (1), pp. 014034.
5. Rohart S., Thiaville A. Skyrmion confinement in ultrathin film nanostructures in the presence of Dzyaloshinskii-Moriya interaction. *Physical Review B*, 2013, vol. 88 (18), p. 184422.



**MAGNETIC ELEMENTS OF NEURAL NETWORKS. PROPERTIES
OF MAGNETIC INHOMOGENEITIES IN RESTRICTED GEOMETRIES**

© A.R. Minibaeva, Z.V. Gareeva

¹ Bashkir State University,
32, ulitsa Zaki Validi, Ufa, 450076, Russian Federation

² Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre
Russian Academy of Sciences,
151, prospekt Oktyabrya, 450075, Ufa, Russian Federation

This paper discusses the prospects for using magnetic nanostructures as elements of neural networks. At present neural network learning programs are actively used in analyzing and processing large data arrays; however, the development of computer technologies based on the neural network principle still remains open. Possibilities for using magnetic elements as physical carriers of information bits in these systems attract much attention from researchers and technologists due to the presence of several easily controlled parameters (order parameter) in the magnetic system, possibilities for the dimensionality reduction in magnetic elements by using magnetic nanostructures (domain boundaries, vortices, ckyrmions), superquick switching between magnetic states and some other factors. One of the key aspects of research in this regard is to determine basic controlled magnetic parameters in restricted geometries and to identify ways of controlling these parameters through internal and external factors. The paper presents a research on the magnetic ground state in restricted geometries. It deals with the magnetic state rebuilding in the system under changes in both external factors (applied magnetic field, sample dimensions) and internal ones (magnetic anisotropy constant, Dzyaloshinskii-Moriya interaction constant). Calculations were performed within the framework of micromagnetic modelling using the Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) software. It is shown that the anisotropic exchange interaction (Dzyaloshinskii-Moriya interaction) has a significant effect on the magnetization distribution in restricted geometries. Namely, when changing the value of the Dzyaloshinskii-Moriya constant in the system with uniaxial magnetic anisotropy there is a series of phase transitions observed between magnetic states of different types: transitions from the homogenous magnetic state into the skyrmion-type vortex state (domain structure with the skyrmion-type unidomain state) with subsequent domain structure reversal when changing the value of the Dzyaloshinskii-Moriya constant. In the case of magnetic anisotropy of *easy-axis* type, chirality and properties of the structures in question do not depend on the constant symbol of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction.

Key words: magnetic nanostructures, Dzyaloshinskii-Moriya interaction, neural networks, magnetic vortices, skyrmions.