

# ВІСІ СИМЕТРІЇ ВИЩИХ ПОРЯДКІВ У МОДЕЛІ ТОПОЛОГІЧНОГО ЛОКАЛІЗОВАНОГО СОЛІТОНУ

М. Ю. Мезенцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Фізико-технічний інститут

## Анотація

Отримано та наочно представлено конфігурації солітонного розв'язку, що описують локалізовані топологічні солітони з віссю симетрії з порядком вищим за другий (зокрема третій, четвертий та п'ятий). Солітонний розв'язок зі спонтанно набутою віссю симетрії другого порядку, що виникає за певних умов, було узагальнено на випадок симетрії порядку  $n > 2$ , та порівняно з магنونною краплею з відповідною симетрією.

*Ключові слова:* солітон, магنونна крапля, магнетик

## Вступ

Наномagnetизм має широкі перспективи до застосування в техніці, в пристроях збереження та передачі інформації. У таких приладах кожна окрема комірка пам'яті буде окремим магнітним вихором, якими є, по своїй суті, магنونні краплі та топологічні солітони в магнетиках. Наявність численних конфігурацій форми, топологічного заряду, індексу намотування, та орієнтації поля всередині, а також можливість змінювати ці параметри, прикладаючи зовнішнє магнітне поле певної величини, разом з малими розмірами структур, дають можливість збільшити щільність запису інформації на носії (частіше за все – плівку мультифероїка).

Модель Іванова[1] описує один з таких розв'язків, та дозволяє відстежувати параметри конфігурації в залежності від розмірів та швидкості обертання солітону. В цій моделі було виявлено [2] можливість спонтанного виникнення вісі симетрії другого порядку. Система магнітних моментів виробляє більш високий ступень порядку, аніж той, що задано складовими процесу – параметрами матеріалу, та динамічними характеристиками вихору. У солітоні відбуваються процеси самоорганізації та формоутворення, що витягують його, та надають в перерізі гантелеподібної форми. Слід зазначити, що такі зміни характерні лише для великих солітонів, починаючи з певного характерного радіусу – менші збурення магнітного поля мають форму кола.

## 1. Модифікація моделі

### 1.1. Форма солітону

Задля виявлення аналогічних властивостей для випадку симетрії  $n$ -го порядку було досліджено ту ж саму модель, але модифіковану для випадків більшої кратності.

Після застосування зазначених модифікацій формули мають наступний вигляд:

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{R}{r} \exp\left(-\frac{r}{b}\right) (1 + C_1 \cos(n\chi))$$

$$\varphi = \chi + C_2 \sin(n\chi) + \frac{\pi}{2}$$

Топологічні солітони являють собою зону у магнетикі, всередині якої спіни вивернуто в протилежний бік від характерного для матеріалу за межами магнітного вихору. Між внутрішньою зоною та зоною з правильно орієнтованими спінами (у даному випадку – за напрямком легкої вісі), пролягає порівняно тонка доменна стінка, межі якої умовно позначаються уявними лініями, де кут, утворений магнітним моментом з легкою віссю перевищує  $\frac{\pi}{4}$ . Оскільки функції розв'язані відносно певних значень цього куту, є неявними, для відстеження впливу членів у пробних функціях, використаних в моделі, було застосовано чисельні методи. Положення меж певних конфігурацій солітонів відбудовувалось на векторних діаграмах з кінцевих множин точок, що належать цій зоні переходу.

Для  $n = 3$  було отримано векторну діаграму на рис. 1.

Показані вектори намагніченості в області переходу, де вони майже лежать в площині. Кожен також відповідає напрямку спінів електронів на межі – видно, що як типові доменні стінки Нееля чи Блоха можна класифікувати лише окремі ділянки межі солітону. Більш детальне вивчення поведінки цієї межі – з використанням динамічної моделі, показує, що під час руйнування структури солітону відбуваються переходи цих ділянок від одного типу межі до іншого. Розмагнічуюче поле вивертає спіни, і, шар за шаром, зменшує солітон до його повного зникнення. Тому можна очікувати, що форма солітону буде впливати на його стабільність, подовжуючи, або, навпаки, прискорюючи час такого розмотування. Але

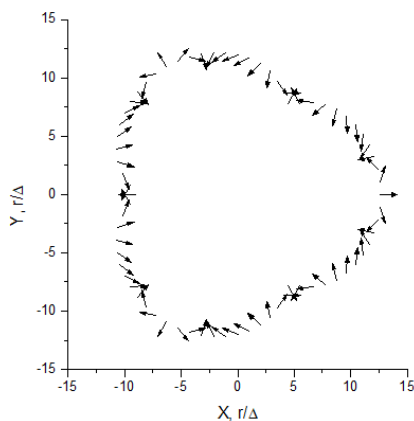


Рис. 1. Діаграма поля, на якій чітко видно вісь симетрії третього порядку

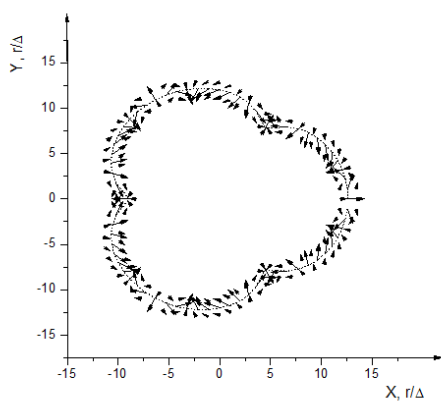


Рис. 2. Межі солітону від  $\theta = \frac{\pi}{4}$  до  $\theta = \frac{3\pi}{4}$

цього не відбувається. Мінімум енергії не залежить від числа  $n$  в ерзац функції обраного виду, тому всі ці конфігурації солітонів, у рамках даної моделі лишаються стабільними.

## 1.2. Товщина стінок

Зазначимо, що це лише форма межі солітону та напрямок магнітних моментів на ній, для повної інформації нам потрібно також визначити її товщину. Для цього ми побудували додаткові лінії на  $\theta = \frac{\pi}{4}$ , та  $\theta = \frac{3\pi}{4}$ . На рис. 2 зображено цю видиму межу солітону. Її товщина набагато менша за радіус солітону, що відповідає зробленим в моделі припущенням, і підтверджує, що можливість отримати таку поведінку є лише у випадку великих солітонів з  $R$  вище критичного, де  $R$  – це спеціальний параметр, що характеризує розмір солітонів неправильної форми.

Таким же чином було отримано діаграми для конфігурацій четвертого, та п'ятого порядків осей симетрії (рис. 3 та 4).

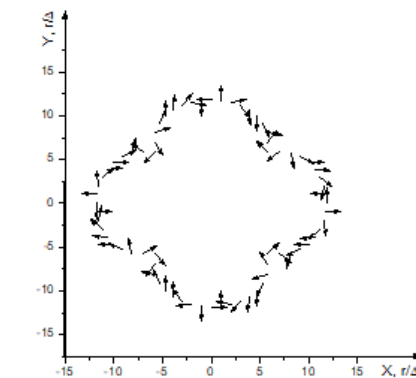


Рис. 3. Четвертий порядок симетрії

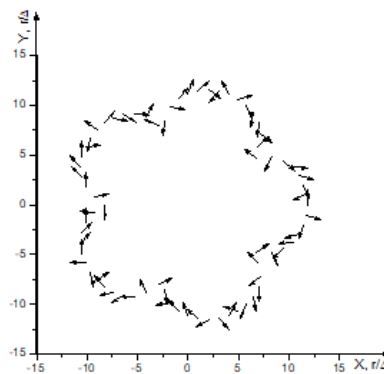


Рис. 4. П'ятий порядок симетрії

Звернемо увагу, що порядок вісі симетрії у формі межі завжди повторює  $n$  закладену у функцію, отже кількість таких конфігурацій необмежена – ми можемо збільшувати  $n$  до нескінченності, і всі ці конфігурації будуть представляти один розв'язок – одну модель – тому всі будуть однаково стабільними, а отже, фізично можливими варіантами форми солітону.

## 2. Порівняння з магнноною краплею

Однак, саме отримані векторні діаграми поля для  $n = 3$  викликають особливий інтерес, через експериментальне відкриття магнноних крапель з таким порядком симетрії [3]. Досліджувана модель накладає обмеження – солітон має бути топологічним, а отже її не можна застосувати до магнноних крапель. Однак це споріднені між собою об'єкти, у яких лише відрізняється значення топологічного заряду.

Модель використана у роботі [4] описує взаємодію між магнетиком та спін-поляризованим струмом, що тече крізь нього. На комп'ютерній симуляції формується схожий солітон – магннона крапля трикутної форми, що пульсує. Вона має виражену симетрію третього порядку. Наведу повне зображення структури поля у топологічному солітоні (рис. 5), чітко розрізняється такий самий трикутник доменної межі. Але у магнноній краплі такий стан швидко розвалюється і стає колом, а потім знову виникає у своїй відзеркаленій версії.

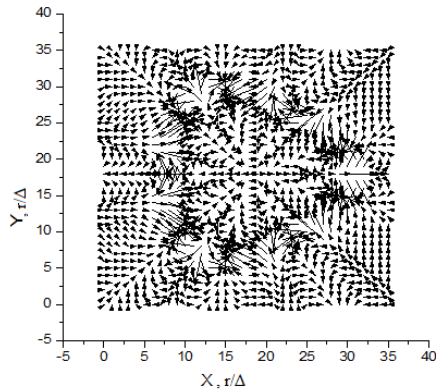


Рис. 5. Повна діаграма розподілу поля,  $n=3$

Таку пульсацію можна розкласти на комбінацію обертального руху з частотою обертів  $\frac{N\pi}{3} + \frac{\pi}{6}$ , та пульсацію в два етапи – коло (як найпростіший випадок солітону Белавіна) та трикутник. А оскільки функція швидкості обертання для топологічного солітону є неперервною у досить великих діапазонах, то ми апріорі можемо знайти параметри швидкості і розміру, за яких топологічний солітон буде утримувати форму трикутника, а магнетонна крапля буде продовжувати зміну форми, лише вдвічі зменшивши період пульсації, настане, так би мовити - синхронізація цих двох подібних систем. Лишається одна трансформація.

У статичній моделі отримати такі пульсації неможливо – навіть з модифікацією у вигляді додавання прецесії спінів, та з урахуванням обертання системи відліку прив'язаної до центру магнетонної краплі. Солітон все одно мав би зони, що мають намагнічуватися і розмагнічуватися перпендикулярно до легкої вісі, щоб утримати такий режим. З іншого боку, це навпаки, не забороняє припинення пульсацій з боку краплі, щоб зробити їх модельні конфігурації ще більш схожими. Магнетонна крапля має нецільове значення топологічного заряду, тому центр такого солітону завжди перебуває в динаміці – а отже, його граничні режими спокою, які ми отримали в рамках моделі:

форми кола та трикутника, для малих і великих розмірів топологічного солітону відповідно, недосяжні для магнетонної краплі при наведених умовах.

Але для обох об'єктів характерне це спонтанне виникнення симетрії третього порядку, тому ці дві різні моделі за своєю суттю описують один процес формування – лише на різних масштабах в часі, та на солітонах з різним топологічним зарядом.

## Висновки

Солітонні розв'язки здатні розвивати такі процеси самоорганізації, що не обмежують математично, або ж фізично, порядок вісі симетрії кінцевої отриманої форми межі солітону. Отриманий на симуляціях магнетонних крапель третій порядок симетрії в роботі [3] є також однією з можливих конфігурацій солітону з цілим топологічним зарядом. Отримана форма доменної стінки та векторні діаграми для нового класу можливих пробних функцій, що узагальнює результат, отриманий у [2] для варіанту  $n = 2$ , та відкриває нові можливості для вивчення спонтанної зміни порядку симетрії солітонних розв'язків, та отримання нових конфігурацій топологічних (а також і нетопологічних) солітонів.

## Перелік використаних джерел

1. Филін Д. В., Іванов Б. А. Солітони малого радіуса в магнетиках з сильною планарною анізотропією // Фізика низьких температур. – 2011. – Т. 37, № 8. – С. 916–919.
2. Filin D. V., Galkina E. G., A. Ivanov B. Large Radius Dynamic Topological Solitons in Uniaxial Ferromagnets // JETP Letters. – 2013. – Vol. 97, no. 5. – P. 253–257.
3. Spin Torque-Generated Magnetic Droplet Solitons / S. M. Mohseni, S. R. Sani, J. Persson et al. // Science. – 2013. – Vol. 339. – P. 1295–1298.
4. Hofer M. A., Sommacal M., Silva T. J. Propagation and control of nanoscale magnetic-droplet solitons // Phys. Rev. B. – 2012. – Vol. 85. – P. 214433.