

05

Циклическое динамическое перемагничивание системы магнитных диполей

© А.М. Шутый

Ульяновский государственный университет
E-mail: shuty@mail.ru*Поступило в Редакцию 15 декабря 2010 г.*

На основе численного анализа исследована динамика магнитного момента кольцеобразной системы шарообразных тел. С помощью бифуркационных диаграмм выявлены условия, необходимые для реализации процесса циклического перемагничивания системы, осуществляемого за счет последовательного возбуждения различных колебательных режимов и включающего фазу с нулевым суммарным магнитным моментом.

Свойства различных дипольных систем и кластеров отличны как от свойств отдельных составляющих их частиц, так и от свойств объемного вещества; причем возможно управление ими сообразно конкретным техническим задачам [1–3]. При этом для анализа процессов самоорганизации [4,5], выявления особенностей фазовых переходов или динамических режимов [6,7] удобными являются магнитные системы благодаря возможности эффективного управления их состоянием. Системы магнитных частиц представляют важный объект исследований также благодаря созданию новых сред при внедрении их в твердотельные пористые матрицы [8,9]. В свою очередь показано, что система частиц в большинстве случаев испытывает процесс агрегации с формированием за счет диполь-дипольного взаимодействия различных по объему кластеров [10,11], в пределах которых связь диполей значительно сильнее связи между кластерами. Ансамбли магнитных частиц могут при этом быть использованы в качестве носителей информации [12–14].

В данной работе на примере анализа кольцеобразной системы восьми тел, обладающих дипольными магнитными моментами, рассмотрены процессы динамического перемагничивания системы за счет возбуждения определенных колебательных режимов суммарного магнитного момента и последующего выключения переменного магнитного

поля. При этом показана возможность осуществления циклического перемангничивания, включающего фазу с нулевым магнитным моментом системы, соответствующая конфигурация которой трудно реализуется при использовании статических внешних полей.

Рассматривая систему диполей, полагаем, что каждый из них связан с другими диполями посредством диполь-дипольного взаимодействия и способен вращаться вокруг неподвижной точки, совпадающей с центрами симметрии и инерции диполя. Время изменения конфигурации системы в целом принимается достаточно большим, чтобы соответствующей динамикой можно было пренебречь. Тела предполагаются однородными и шарообразными [15], материал объектов — магнитомягким. Принимая диполи идентичными — с равными по модулю дипольными магнитными моментами $|\mathbf{p}_i| = p$ и моментами инерции $J_i = J$ — и переходя к безразмерным параметрам, запишем динамические уравнения для связанных диполей в присутствии переменного магнитного поля $\mathbf{h}(t)$ [7]:

$$\begin{aligned} \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{d\tau} &= -\beta\boldsymbol{\omega}_i + \boldsymbol{\rho}_i \times \left(\mathbf{f}(\tau) + \sum_{n \neq 1} [3\mathbf{e}_{in}(\boldsymbol{\rho}_n e_{in}) - \boldsymbol{\rho}_n] / l_{in}^3 \right), \\ \frac{d\boldsymbol{\rho}_i}{d\tau} &= \boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{\rho}_i, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь дифференцирование проводится по безразмерному времени $\tau = vt$, где $v = \sqrt{p^2/Ja^3}$; $\mathbf{e}_{in} = \mathbf{r}_{in}/r_{in}$ — единичные вектора вдоль направления, где \mathbf{r}_{in} — вектор между расположениями i -го и n -го диполей, $l_{in} = r_{in}/a$ — расстояние, нормированное на характерный параметр конфигурации системы a ; $\boldsymbol{\omega}_i = d\varphi_i/d\tau$ — угловая скорость i -го диполя (φ_{ij} — угол поворота соответствующего диполя вокруг оси $j = x, y, z$); $\boldsymbol{\rho}_{ij} = p_{ij}/p$ — нормированные компоненты векторов магнитных моментов; остальные параметры

$$\beta = \alpha/(vJ), \quad f_j(\tau) = h_j(\tau)p/(v^2J), \quad (2)$$

где α — параметр диссипации.

При отсутствии внешнего поля ($f_j = 0$) для систем с достаточно большим числом диполей характерны бистабильные состояния, отличающиеся величиной суммарного магнитного момента $\mathbf{P} = \sum \boldsymbol{\rho}_i$. В случае кольцевых структур при числе диполей $N \geq 8$ устанавливается не менее

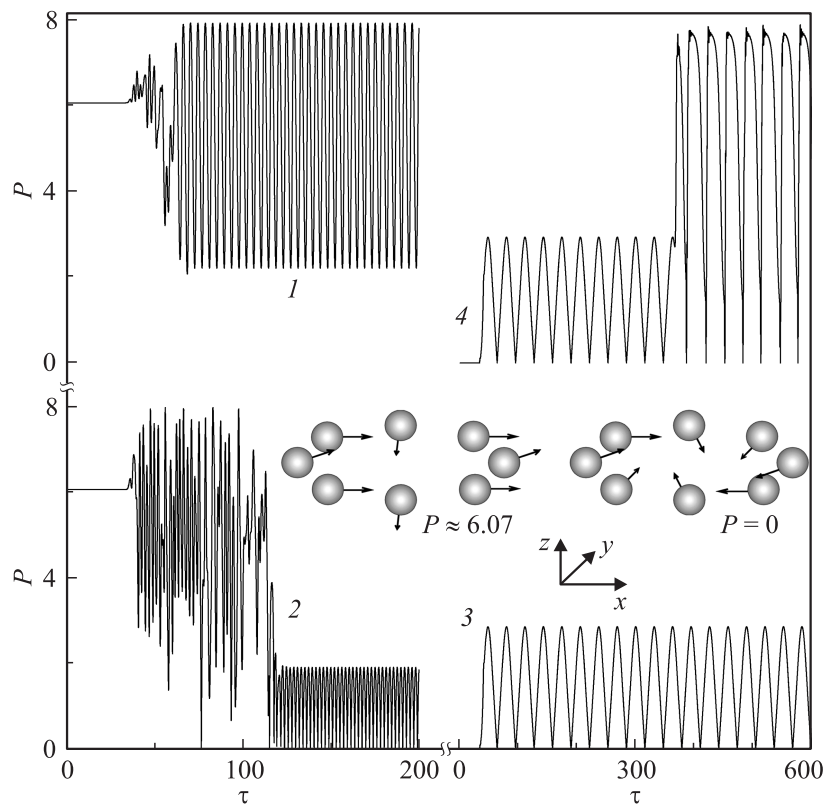


Рис. 1. Временная зависимость величины нормированного магнитного момента системы на частоте $\Omega = 1.5$ при $f_{0y} = f_0 = 2.0$ и 5.0 (кривые 1 и 2), и на частоте $\Omega = 0.1$ при $f_{0y} = f_0 = 6.9$ и 7.0 (кривые 3 и 4); $\beta = 1$; на вставке: равновесные ориентации магнитных диполей системы при двух значениях суммарного магнитного момента.

двух равновесных состояний [16]: с нулевым значением магнитного момента $P = 0$ (рис. 1) и с максимальным значением

$$P_{\max} \approx 0.63N + 1.02. \quad (3)$$

Далее рассмотрим кольцеобразную систему восьми идентичных диполей, располагающихся в вершинах правильного восьмиугольника [14],

который лежит в плоскости xu (угол между осью x и направлением на i -тую вершину составляет величину $\theta_i = 2\pi/N$).

В случае возбуждения системы линейно поляризованным магнитным полем $\mathbf{h}_0 \sin(\omega t)$ реализуются различные по амплитуде колебания магнитного момента. При этом в большом интервале значений нормированной амплитуды внешнего поля f_0 и его частоты $\Omega = \omega/v$ имеют место состояния динамической бистабильности, и установление того или иного режима определяется исходным равновесным состоянием системы. На рис. 1 приведена временная зависимость нормированного магнитного момента системы на частоте $\Omega = 1.5$ при ориентации внешнего поля вдоль оси y и $f_{0y} = f_0 = 2.0$ и 5.0 (кривые 1 и 2) и на частоте $\Omega = 0.1$ при $f_{0y} = f_0 = 6.9$ и 7.0 (кривые 3 и 4); параметр диссипации $\beta = 1$ (здесь и далее). Кривые 1 и 2 отвечают исходной конфигурации с $P \approx 6.07$, а кривые 3 и 4 — с нулевым суммарным магнитным моментом. При достаточно малых амплитудах внешнего поля устанавливаются колебания магнитного момента относительно равновесных состояний, взятых в качестве исходных (кривые 1 и 3). При усилении поля возникает динамический фазовый переход: на частоте $\Omega = 1.5$ колебания, отвечающие кривой 1, переходят в колебания с нулевым средним значением (кривая 2), а режимы на частоте $\Omega = 0.1$, отвечающие исходной конфигурации с $P = 0$, переходят в колебания со значительно большей амплитудой (кривая 4).

Детальный анализ динамических режимов суммарного магнитного момента удобно проводить с помощью параметрических бифуркационных диаграмм [17,18]. На рис. 2 приведена диаграмма для величины магнитного момента системы диполей на плоскости $(P_m; f_0)$, где $P_m = P_{\max}$, P_{\min} и каждому значению параметра $f_{0y} = f_0$ соответствуют экстремальные значения суммарного магнитного момента на частоте поля $\Omega = 0.1$ и 1.5 (рис. 2, *a* и *b*). При этом если на диаграмме одному значению f_0 отвечает две точки или большее конечное их число, то реализуются регулярные колебательные режимы; множеству близко расположенных точек (за исключением области III) отвечает хаотическая динамика. Ветви диаграммы, обозначенные цифрой „1“, соответствуют исходной конфигурации системы с $P = 0$, а ветви „2“ — исходной конфигурации с $P \approx 6.07$. На диаграмме можно выделить два основных интервала значений управляющего параметра f_0 . В интервале I, отвечающем относительно слабым полям, имеет место динамическая бистабильность, и при различной исходной конфигурации

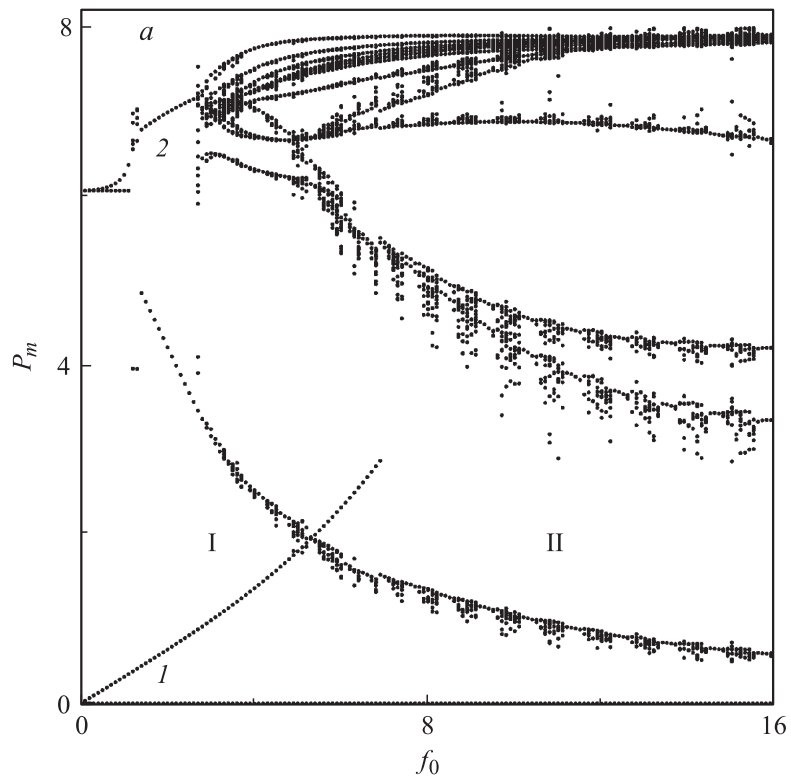


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма для величины магнитного момента системы: зависимость от параметра внешнего поля f_0 экстремальных значений суммарного магнитного момента на частоте $\Omega = 0.1$ (*a*) и $\Omega = 1.5$ (*b*); $\beta = 1$; ветви *1* отвечают исходной конфигурации с $P = 0$, ветви *2* — конфигурации с $P \approx 6.07$.

магнитных диполей устанавливаются различные колебательные режимы, а в интервале II, отвечающем достаточно сильным полям, бистабильность отсутствует. При этом на малой частоте (рис. 2, *a*) при переходе в область II неустойчивыми оказываются режимы ветви *1* (отвечающей исходному состоянию с $P = 0$), и устанавливаются колебания значительно большей амплитуды, относящиеся к ветви *2* (которая отвечает исходному состоянию с $P \approx 6.07$). Заметим, для $f_0 \geq 2.7$ колебания

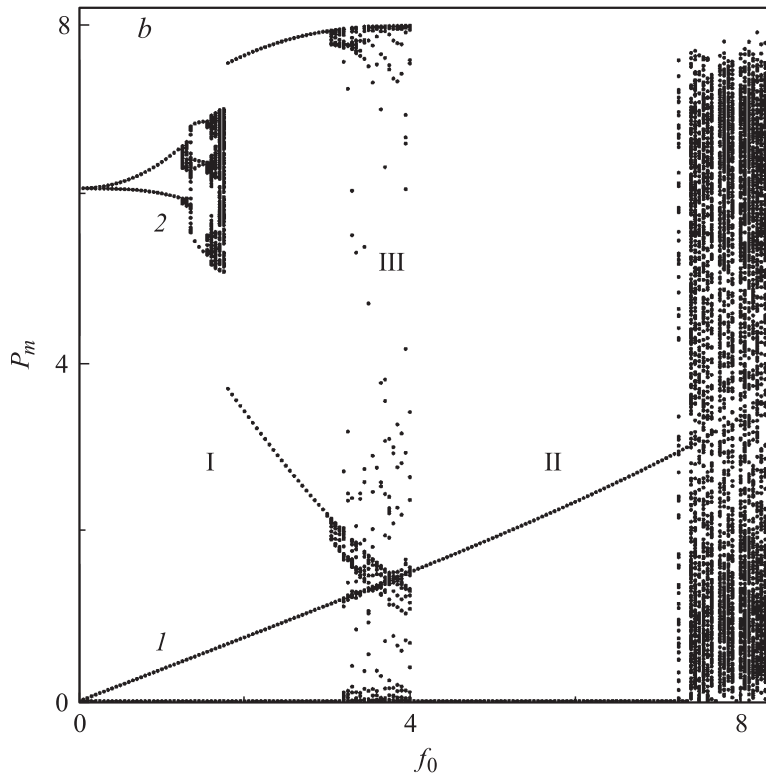


Рис. 2 (продолжение).

ветви 2 проходят через нулевое значение магнитного момента (см. кривую 4, рис. 1), в случае же слабых полей этой ветви отвечают режимы, подобные режиму, представленному кривой 1. На большой частоте (рис. 2, *b*) в области II неустойчивы режимы ветви 2, и единственной оказывается ветвь колебательных режимов, отвечающая равновесному состоянию с $P = 0$. Область III (на рис. 2, *b*) отвечает режимам ветви 1 с большим временем установления стационарных колебаний (множество точек в этой области соответствуют продолжительной переходной динамике).

Равновесная конфигурация системы с $P \approx 6.07$ устанавливается достаточно легко за счет приложения статического подмагничиваю-

шего поля. Однако для эффективного управления системой с целью использования ее в решении задач обработки информации требуются циклические перемагничивания, причем наибольший интерес будут представлять циклы, включающие состояние с $P = 0$. Однако перевести конфигурацию с $P \approx 6.07$ в конфигурацию с нулевым суммарным магнитным моментом с помощью статического поля не удастся — происходит лишь поворот магнитного момента системы.

Полученные выше диаграммы показывают, что циклическое перемагничивание, включающее состояние с нулевым магнитным моментом, можно получить за счет использования различных колебательных режимов. При возбуждении режима ветви, соответствующей исходному состоянию с $P = 0$, и последующем выключении переменного поля, после переходного процесса устанавливается равновесное состояние с нулевым суммарным магнитным моментом. Аналогичным образом, при возбуждении колебаний ветви, соответствующей равновесному состоянию с $P \approx 6.07$, после выключения поля устанавливается указанное равновесное состояние. При этом параметры переменного поля должны отвечать области без динамической бистабильности, т.е. области II диаграммы на рис. 2. В качестве примера на рис. 3 приведена временная зависимость магнитного момента системы при реализации указанного циклического перемагничивания, путем возбуждения различных колебательных режимов. В моменты времени τ_1 , τ_3 и τ_5 включается направленное вдоль оси y переменное поле, частота которого $\Omega = 0.1$, а амплитуда нарастает по экспоненциальному закону за время $\tau = 7$ с нулевого значения до $f_0 = 8$; и через $\tau \approx 100$ оно выключается (уменьшаясь по экспоненте). Время действия переменного поля выбрано минимальным — таким, чтобы основную часть занимал переходный процесс, в конце которого амплитуда колебаний магнитного момента резко увеличивается и выключение поля приводит к установлению равновесной конфигурации с $P \approx 6.07$. В моменты времени τ_2 , τ_4 и τ_6 включается направленное вдоль оси y переменное поле частотой $\Omega = 1.5$, амплитуда которого нарастает по тому же экспоненциальному закону с нулевого значения до $f_0 = 5$, а через $\tau \approx 110$ поле выключается. Время динамической фазы также выбрано минимальным — в конце переходного процесса магнитный момент выходит на тот колебательный режим, с которого при выключении переменного поля система приходит к равновесному состоянию с нулевым суммарным магнитным моментом.

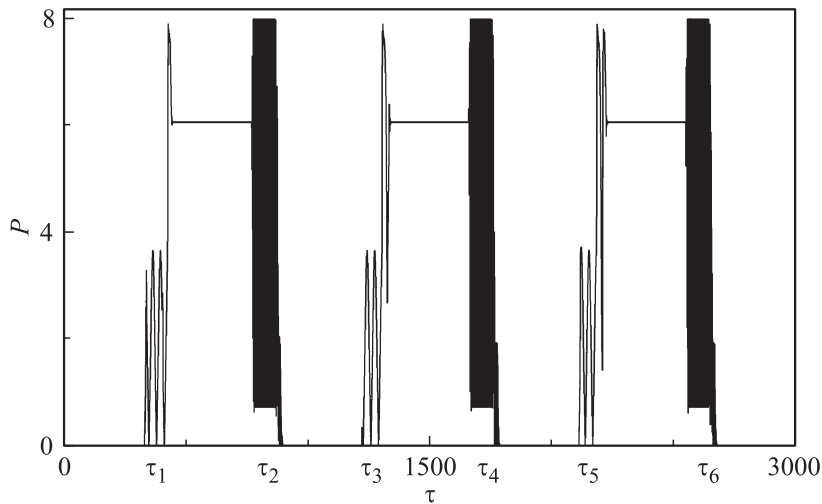


Рис. 3. Временная зависимость магнитного момента системы при реализации циклического перемагничивания за счет возбуждения различных колебательных режимов при последующем выключении внешнего поля.

Анализ кольцеобразной системы восьми магнитных диполей показал, что при ее возбуждении переменным магнитным полем реализуются состояния динамической бистабильности, при которой установление того или иного колебательного режима определяется исходным равновесным состоянием системы. При этом имеют место области значений параметров переменного поля, отвечающие потере устойчивости либо одной, либо другой составляющей бистабильности ветви динамических режимов. Это позволяет, используя возбуждение различных колебательных режимов при последующем выключении внешнего поля, осуществлять процесс циклического динамического перемагничивания системы диполей. Одной из фаз данного процесса является состояние с нулевым суммарным магнитным моментом, установление ее за счет статического подмагничивающего поля затруднительно. Возможность реализации динамического циклического перемагничивания следует ожидать и в других аналогичных системах, в которых имеют место выявленные особенности состояний статической и динамической бистабильности.

Список литературы

- [1] *Смирнов Б.М.* // УФН. 2007. Т. 177. В. 4. С. 366–373.
- [2] *Макаров Г.Н.* // УФН. 2008. Т. 178. В. 4. С. 337–376.
- [3] *Меленев П.В., Русаков В.В., Райхер Ю.Л.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 6. С. 50–56.
- [4] *Филиппов Б.Н., Корзунин Л.Г.* // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. В. 2. С. 372–387.
- [5] *Кандаурова Г.С., Осадченко В.Х., Пашко А.Г.* // ФТТ. 2005. Т. 47. В. 10. С. 1806–1812.
- [6] *Шутый А.М.* // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87. В. 3. С. 181–186.
- [7] *Шутый А.М.* // ЖЭТФ. 2009. Т. 135. В. 5. С. 1009–1020.
- [8] *Eliseev A.A., Vyacheslavov A.S., Lukashin A.V., Tretyakov Yu.D., Suzdalev I.P., Maksimov Yu.V., Goernert P.* // International J. Nanoscience. 2006. V. 5. N 4&5. P. 459–463.
- [9] *Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К.* // УФН. 2007. Т. 177. В. 6. С. 619–638.
- [10] *Гладких Д.В., Диканский Ю.И.* // ЖТФ. Т. 76. В. 8. С. 13–18.
- [11] *Лахтина Е.В., Пшеничников А.Ф.* // Коллоидный журнал. 2006. Т. 68. № 3. С. 327–337.
- [12] *Кожевников В.М., Чуенкова И.Ю., Данилов М.И., Ястребов С.С.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 7. С. 129–131.
- [13] *Шанина Б.Д., Данишевский А.М., Вейнгер А.И., Курдюков Д.А., Гордеев С.К.* // ФТТ. 2009. Т. 51. В. 3. С. 593–603.
- [14] *Куликов Д.В., Курносиков О., Сико М., Трушин Ю.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 2. С. 8–14.
- [15] *Губин С.П., Кокиаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю.* // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 6. С. 539–574.
- [16] *Шутый А.М.* // ЖЭТФ. 2010. Т. 137. В. 2. С. 277–286.
- [17] *Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С.* Основы теории сложных систем. Ижевск: НИЦ „РХД“, 2008. 620 с.
- [18] *Семенцов Д.И., Шутый А.М.* // УФН. 2007. Т. 177. В. 8. С. 831–857.