

06;12

МАГНИТНО-НАКОПИТЕЛЬНАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА

© А.А.Кальнин, Ле Чунг Тянь, А.Шонс, Х.Энгельхардт

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 28 августа 1995 г.)

В окончательной редакции 27 июня 1996 г.)

Изложен принцип создания синергетической адаптивной системы для анализа и распознавания образов, действие которой основано на изменении магнитной проницаемости материала адаптивных элементов под влиянием корректирующих импульсов магнитного поля. В систему заложен эффект накопительности корректирующих действий в связанных фрагментах из адаптивных элементов. Демонстрируется способность системы к выполнению функций детектирования коррелянтов во множествах сигнальных воздействий и распознавания образов при нечетких наборах признаков.

Введение

Как известно, сетевой принцип, полагаемый в основу создания адаптивных информационных систем, в отличие от схемного допускает значительные конструктивно-технологические степени свободы и более высокую надежность. Последнее достигается введением элементной избыточности и отсутствием жесткого плана межэлементных связей [1].

Данное исследование направлено на создание простой модели физической (невыхислительной) адаптивной системы с облучением, в которой параметрическая адаптация происходит под прямым воздействием физических (термодинамических) сил в коллективных отношениях элементов [2]. При этом выработка условной ответной реакции в процессе обучения не требует отслеживания состояний адаптивных элементов, составляющих систему, т. е. контроль и коррекция магнитного состояния реализуются на макроуровне.

Известно также, что элементы физической адаптивной системы должны удовлетворять трем требованиям [2,3]: градируемость физической величины, сохраняемость физической величины в памяти (предпочтительно энергонезависимой), способность к перераспределению значений физической величины в коллективных межэлементных отношениях.

Последнему условию, которое обеспечивает возможность авторегулирования весовых отношений в сетевых системах, как показывает практика, удовлетворить оказывается наиболее трудно. В этом состоит один из важнейших аспектов развивающейся области знания — “материалы и элементы для физических адаптивных систем”. Заметим также, что лишь небольшое число физических эффектов обеспечивает энергонезависимое сохранение в памяти аналоговых величин с приемлемой для практических целей точностью. Магнитные материалы являются классическими в реализации функции аналоговой памяти. Такое качество, как сравнительно высокая энергоемкость процедуры “запись-считывание”, в данном исследовании оказывается значительно смягченным тем, что в условиях распознавания нечетких образов необходима их многократная демонстрация для выявления доминантных признаков, что позволяет положить в основу анализа и распознавания образов накопительный эффект от многих демонстраций. При этом при каждой демонстрации образа происходит лишь малая “подвижка” магнитного состояния с соответственно малыми энергетическими затратами. Опрос состояния системы производится в режиме малого гармонического сигнала.

Ранее [4] в качестве адаптивного элемента сетевой системы был подвергнут изучению ВЧ трансформатор с симметричной выходной обмоткой и ветвящимся магнитопроводом. Параметром управления является коэффициент трансформации, который мог варьироваться сигналом коррекции, меняющим меру асимметрии ветвей магнитопровода.

Целью настоящей работы являлось развитие инженерных основ создания физических сетевых адаптивных систем. При этом главное внимание уделялось исследованию накопительных свойств магнитного материала, изучению свойств адаптивного магнитного элемента и параметрической эволюции связанных множеств элементов под влиянием импульсных корректирующих сигналов. При этом был изготовлен действующий образец магнитной адаптивной системы для анализа и распознавания нечетких образов.

1. Адаптивный магнитный элемент и свойство накопительности

Адаптивный магнитный элемент (АМЭЛ) представляет собой управляемую индуктивность, реализованную катушкой 20 витков на миниатюрном кольцевом сердечнике. Материал сердечника — магний-марганцевый феррит марки 1.3 ВТ. Физический процесс, реализующий указанное качество АМЭЛ, есть изменение после кратковременного импульсного действия магнитного поля H_u дифференциальной магнитной проницаемости материала сердечника μ^{\sim} . Импульс магнитного поля выполняет роль сигнала коррекции магнитного состояния. Опрос состояния АМЭЛ производится с помощью малого переменного сигнала H^{\sim} в отсутствие внешнего постоянного подмагничивающего действия. Параметром контроля состояния может быть, например, реактивное сопротивление $x(\omega)$ на заданной частоте ω . Подчеркнем еще раз, что нас интересует эффект последствия импульсной коррекции.

Таким образом, изучаемый параметр есть остаточная дифференциальная магнитная проницаемость μ^{\sim} . Малосигнальность в режиме

опроса АМЭЛ означает обратимый характер изменения магнитной индукции при вариациях напряженности магнитного поля в окрестности его нулевого значения.

Эффект накопительности понимается как результат действия на АМЭЛ множеств последовательно действующих импульсов магнитного поля различной амплитуды и полярности. При этом обязательными условиями, накладываемыми на параметры импульса магнитного поля, являются превышение напряженности магнитного поля H_u значения коэрцитивной силы материала сердечника H_c и малая длительность импульса τ_u , обеспечивающая лишь частичную работу намагничивания (перемагничивания),

$$H_u \gg H_c, \quad (1)$$

$$\tau_u \ll \tau_0, \quad (2)$$

где τ_0 — время полного перемагничивания для заданного значения H .

Выполнение условия (1) необходимо для предотвращения возобновления ошибки в процессе обучения системы, которая может быть вызвана разбросом значений коэрцитивной силы материала различных АМЭЛ. Иными словами, могут появиться в системе чрезмерно "податливые" на корректирующее действие элементы и малое H_u может дать избирательное отношение элементов к коррекции. Выполнение условия (2) необходимо для обеспечения проявления доминантных черт в нечетких множествах признаков.

При создании адаптивных магнитных систем нас в первую очередь будет интересовать реактивность АМЭЛ на корректирующее действие, т. е. относительная мера изменения магнитного состояния $\Delta\mu_i^{\sim}/\mu_{i0}^{\sim}$ в коллективных отношениях, когда импульс коррекции действует на связную группу АМЭЛ (раздел 3), находящихся в общем случае в различных перед коррекцией магнитных состояниях μ_{i0}^{\sim} (здесь i — номер АМЭЛ в связной группе, $\Delta\mu_i^{\sim} = \mu_i^{\sim} - \mu_{i0}^{\sim}$ — изменение проницаемости после действия импульса, $\mu_{i0}^{\sim}, \mu_i^{\sim}$ — значения проницаемостей до и после действия импульса соответственно). Важно отметить, что $\Delta\mu_i^{\sim}/\mu_{i0}^{\sim}$ будет зависеть не только от магнитного состояния перед коррекцией но и предыстории его достижения.

На рис. 1 представлены зависимости, отражающие характерные эффекты накопительного действия импульсов коррекции магнитного состояния. При действии последовательности однополярных импульсов на АМЭЛ, находящийся в размагниченом стартовом состоянии, заметное изменение проницаемости в сторону ее повышения начинается с некоторого числа импульсов (рис. 1, а, кривая 1). Участок спада μ^{\sim} сменяется участком насыщения, на котором μ^{\sim} достигает своего наименьшего значения μ_s^{\sim} . Если одиночные импульсы одной полярности регулярно чередуются с импульсами обратной полярности с коэффициентом однонаправленности $k_u = (N^+ - N^-)/(N^+ + N^-)$, где N^+ и N^- — числа импульсов с прямой и обратной полярностями, то с уменьшением k_u спад μ^{\sim} становится менее резким (кривые 2, 3), а предельное значение μ_s^{\sim} возрастает, достигая μ_m^{\sim} при $k_u = 0$ (кривая 4).

Если стартовым состоянием АМЭЛ является предельная намагниченность материала ($\mu^{\sim} = \mu_s^{\sim}$), то действие однонаправленных импульсов, оказывающих размагничивающее (перемагничивающее) действие,

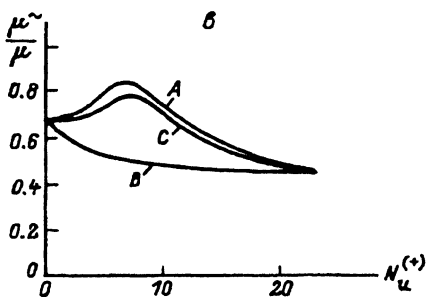
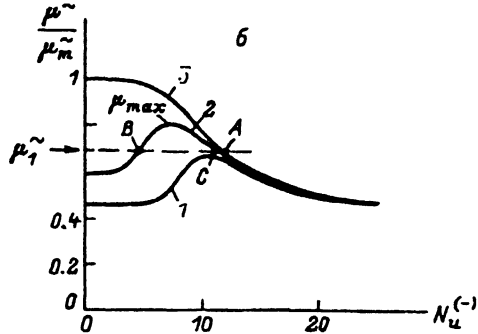
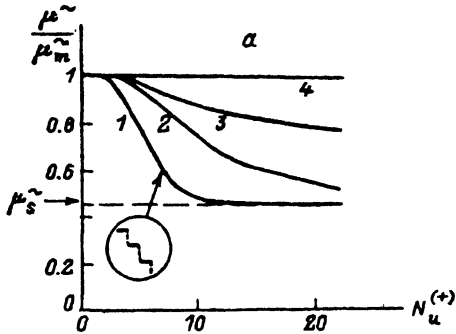


Рис. 1. Зависимость остаточной дифференциальной магнитной проницаемости от числа действующих на материал АМЭЛ импульсов магнитного поля при различных стартовых ситуациях.

характеризуется вначале задержкой реакции АМЭЛ, затем увеличением μ^{\sim} до некоторого максимального значения μ_{max}^{\sim} с последующим спадом проницаемости до μ_s^{\sim} (рис. 1, б, кривая 1). Меньшая мера начальной намагниченности (кривые 2, 3) уменьшает число импульсов, необходимое для начала подъема μ^{\sim} , а также для достижения μ_{max}^{\sim} .

Зависимость реакции АМЭЛ от предыстории демонстрирует рис. 1, в. Одно и то же значение μ_1^{\sim} было достигнуто движением АМЭЛ из размагниченного состояния (кривая 1), из намагниченного движением до экстремума μ_{max}^{\sim} и продвижением за экстремальное значение (кривая 2) (точки А, В, С, соответствующие стартовой позиции АМЭЛ, нанесены на рис. 1, б).

2. Система для анализа и распознавания образов

Отмеченные выше качества АМЭЛ положены в основу создания сетевой адаптивной системы для анализа и распознавания образов, обладающей энергонезависимой памятью (рис. 2). Одна строка матрицы магнитной сетевой системы представляет собой 30 соединенных последовательно АМЭЛ. Параллельно каждому АМЭЛ включен транзистор, выполняющий функцию шунтирующего ключа. При пропускании тока базы транзистор, имея малое дифференциальное сопротивление между выводами коллектор-эмиттер, оказывает шунтирующее действие и, таким образом, пассивирует АМЭЛ при опросе и коррекции магнитного состояния. С помощью 15 ключей, распределяющих бинарно токи базы, создается определенная ключевая ситуация $\{S_k\}$, соответствующая входному образу — стимулу, сообщаемому

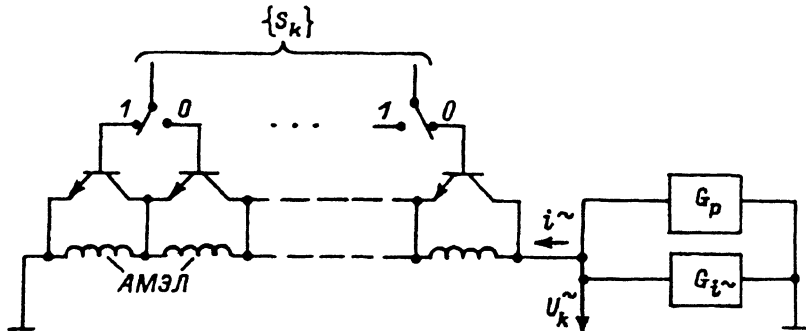


Рис. 2. Фрагмент сетевой адаптивной системы (строка матрицы).

активность половине из множества АМЭЛ (связный k -фрагмент). Изменение, в том числе коррекция магнитного состояния k -фрагмента, осуществляется с помощью генератора токовых импульсов G_p . Опрос состояния k -фрагмента производится с помощью генератора гармонического токового сигнала $G_{i\sim}$ на выбранной частоте ω_0 (в нашем случае частота $\omega_0 = 5.2$ МГц).

Для повышения чувствительности системы к изменению магнитного состояния связанного фрагмента использовалась собственная емкость АМЭЛ, а частота генератора дающего сигнал опроса $i\sim$, устанавливалась соответствующей резонансной для размагниченного состояния всех АМЭЛ, составляющих систему. В качестве сигнала контроля состояния системы в нашем случае было выбрано падение напряжения $U_k\sim$ на фрагменте k -связности

$$U_k\sim = u_0\sim \sum_{i=1}^n \left(1 + \sum_{m=1}^q \frac{\Delta u_{im}\sim}{u_0\sim} \right), \quad (3)$$

где $u_0\sim$ — начальное (стартовое) падение напряжения на АМЭЛ; $\Delta u_{im}\sim$ — изменение падения напряжения на i -АМЭЛ (i — номер элемента в цепи) при действии m -го токового импульса, q — полное число действовавших импульсов.

Решение задачи анализа и распознавания нечетких образов производилось следующим образом. Системе предъявлялось множество из 10 “изображений”, которые символизируются бинарной ключевой ситуацией $\{S_k^{(p)}\}$ (p — вариант нечеткого представления k -образа, т.е. изображение). Эти изображения представлены на рис. 3, а, где черный цвет на координатном поле из 15 признаков означает присутствие признака. Используя стартовое размагниченное состояние элементов, производилась последовательная демонстрация каждого из 5 изображений, которая заключалась в подаче накопительного импульса после создания изображения.

После всех пяти демонстраций в системе возникает адаптивный “отпечаток” изображений, причем мера накопленных изменений в элементах оказывается различной и зависит от того, случайный или доминантный признак заложен в демонстрируемых изображениях. Заметим при этом, что в выбранной нами архитектуре системы доминантными

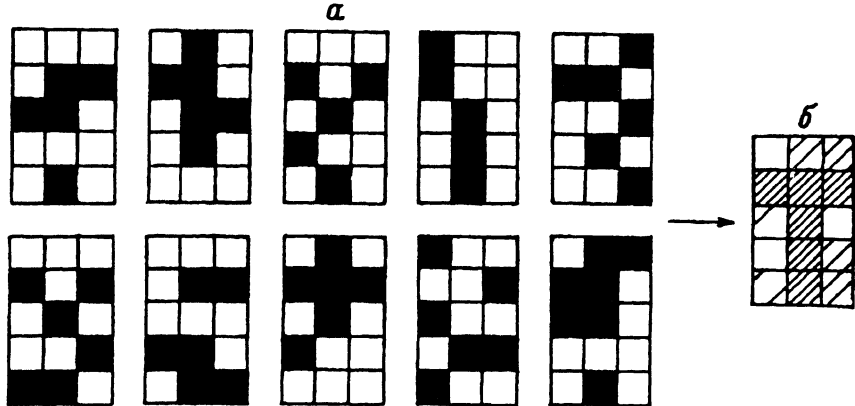


Рис. 3. Набор нечетких изображений (слева) и результат анализа доминантных признаков с помощью магнитной адаптивной системы (справа), выявляющий символ T (плотность штриховых линий на итоговом изображении отражает реакцию системы на смену признака $0 \rightarrow 1$).

могут оказаться как 0 (отсутствие), так и 1 (присутствие признака), т.е. обеспечивается реактивность системы в любом варианте представления доминанты. Селекция доминантных признаков после демонстрации изображений и синтез на этой основе “незашумленного” образа производились изучением реактивности системы на смену признака $0 \rightarrow 1$, т.е. изменением напряжения ΔU_{kf}^{\sim} на системе АМЭЛ при появлении f -признака

$$\Delta U_{kf}^{\sim} = U_{kf}^{\sim}(1) - U_{kf}^{\sim}(0), \quad (4)$$

где $U_{kf}^{\sim}(1)$ и $U_{kf}^{\sim}(0)$ — значения напряжений на системе АМЭЛ при наличии и отсутствии f -признака.¹

При этом действовало следующее правило. Если

$$\Delta U_{kf}^{\sim} > 0, \quad (5)$$

$$|\Delta U_{kf}^{\sim}| \rightarrow u_1, \quad (5)$$

то 0 — доминанта.

Если

$$\Delta U_{kf}^{\sim} < 0, \quad |\Delta U_{kf}^{\sim}| \rightarrow u_1, \quad (6)$$

то 1 — доминанта. Если

$$\Delta U_{kf}^{\sim} \rightarrow 0, \quad (7)$$

то признак случайный. Здесь u_1 — максимально возможное приращение напряжения на системе АМЭЛ. Мерой случайности признака является уменьшение реактивности системы на смену признака, что в пределе дает условие (7). Рис. 3, б демонстрирует синтезированный по правилам (5)–(7) образ, который хранится в системе.

¹ В изготовленной системе это соответствовало открытому или закрытому состоянию элемента на фотоприемной матрице.

Легко может быть найдена мера сходства демонстрируемого k -изображения хранящемуся в памяти k -образу. Наибольшее сходство изображения из серии демонстраций должно присваиваться тому изображению которое будет иметь наименьшее контрольное напряжение U_k^{\sim} .

Система также способна к обучению условной ответной реакции на набор признаков. В основу процедуры обучения положено перераспределение вкладов АМЭЛ в выходной контрольный сигнал U_k^{\sim} (т. е. регулирование весовых отношений (см., например, [3])). Правильная выходная реакция может быть “воспитана” в системе многократной циклической демонстрацией относительно устойчивых наборов признаков и возбуждением на выходе системы требуемого сигнала отклика. Это может быть достигнуто подачей однополярного импульса в соответствующих наборах признаков (накопительная стратегия) или с использованием разнополярных импульсов с различной амплитудой для коррекции выходного сигнала. При этом необходимо принять во внимание особенности реакций АМЭЛ на импульсное воздействие, изложенные в разделе 1.

3. Магнитный материал — среда с иерархической эволюционной динамикой

Заключительные замечания по данному исследованию касаются возможности построения обобщенной феноменологической модели среды с иерархической эволюционной динамикой. Адаптивные свойства во многом определяются фактором иерархичности внутренних “подвижек” под влиянием действующих сигналов, при этом сама иерархичность сообщает ценные качества системам (см., например, [6,7]). Ограничимся в этом сообщении лишь констатацией характерных свойств магнитного материала, позволяющих рассматривать его реакции с позиций иерархической динамики, и введем простейшую модель, являющую собой механическую аналогию, способную отражать указанные свойства и, возможно, побудить создание модели адекватного описания реактивности магнитных материалов.

Итак, для магнитного материала характерны: сдвиг порога появления реакции в сторону больших значений при смене направления магнитного поля, если начальное намагничивание возрастает; большая реактивность материала на импульсное действие при смене направления импульса магнитного поля; неполное восстановление магнитной проницаемости в экстремуме при смене направления магнитного поля.

Последнее качество требует многократной смены направления магнитного поля со снижением его значения для достижения состояния размагничности материала.

Суть механической аналогии, иллюстрирующей указанные качества, состоит в следующем. Рассмотрим движение сфер на рельефной поверхности с переменной глубиной рельефа под влиянием силы гравитации (рис. 4). Направление движения сфер задается наклоном поверхности относительно горизонта, а значение движущей силы — углом наклона. Положим, что начальное распределение сфер в углублениях однородно, при этом число сфер N_s меньше полного числа вакантных позиций (углублений) N_v (рис. 4, а). Коэффициент заполнения вакантных позиций $\xi = N_s/N_v$. При действии гравитационной

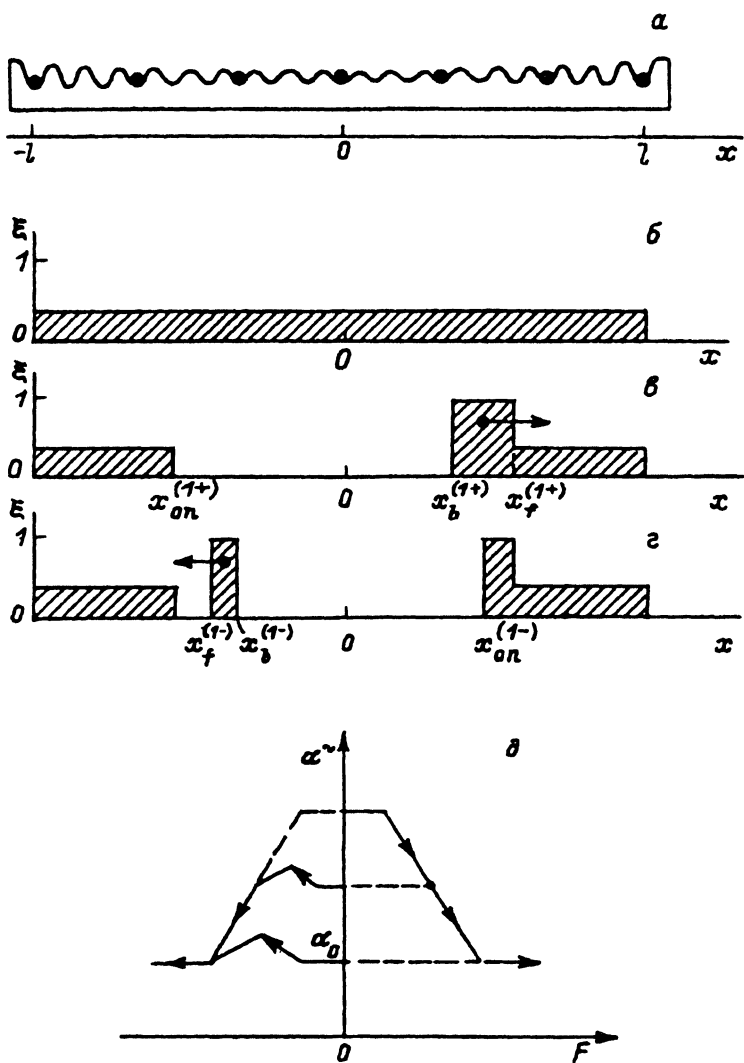


Рис. 4. Модель системы с иерархической эволюционной динамикой (движение сфер на волнистой поверхности с переменной высотой барьеров).

а — исходное однородное распределение сфер и соответствующее ему распределение плотности сфер ξ по координате x (б); в — образование волны уплотнения сфер при действии гравитационной силы $F^{(1+)}$ (наклон поверхности вправо); г — возникновение обратной волны уплотнения при действии силы $F^{(1-)}$ обратного направления; д — качественная зависимость податливости механической системы $\alpha \sim$ на малые возмущения (аналог проницаемости), на предварительное действие тянущих сил F .

силы (наклон вправо) происходит образование, продвижение и развитие волны уплотнения сфер (рис. 4, б). При этом координата возможного опустошения углубления в левой части симметричной системы углублений равна $x_{он}^{(1+)}$ (символ 1+ означает первичное приложение тянущей силы $F^{(1+)}$ в положительном направлении) определяется ра-

$$F^{(1+)} - \frac{dU(x)}{dx} \Big|_{x=x_{0n}^{(1+)}} = 0, \quad (8)$$

где $U(x)$ — зависимость потенциальной энергии сферы от координаты x .

Позиция переднего фронта волны уплотнения сфер $x_f^{(1+)}$ несколько больше значения $|x_{0n}^{(1+)}|$ вследствие влияния давления скопившихся сфер при $x < x_f^{(1+)}$. Координата заднего фронта волны $x_b^{(1+)}$ определяется коэффициентом заполнения вакантных позиций и числом сфер в волне

$$x_b^{(1+)} = x_f^{(1+)} - \xi \left(x_f^{(1+)} - x_{0n}^{(1+)} \right). \quad (9)$$

Если за аналог остаточной дифференциальной магнитной проницаемости принять меру податливости сфер на малое гармоническое возмущение, наибольшее координатное смещение будут испытывать сферы, у которых не заняты смежные вакантные позиции. При этом волна уплотнения сфер уменьшает “проницаемость” системы. Положим, что условная проницаемость α_{\sim} состоит из постоянной составляющей $\alpha_{\sim 0}$ и варьируемой под влиянием развивающихся процессов части $\alpha_{\sim \text{var}}$

$$\alpha_{\sim} = \alpha_{\sim 0} + \alpha_{\sim \text{var}}, \quad (10)$$

при этом вклад участка рельефа Δx , на котором имеются сферы $\Delta \alpha_{\sim \text{var}}$, может быть представлен величиной, пропорциональной числу занятых n^* и вакантных n_v позиций на этом участке,

$$\Delta \alpha_{\sim \text{var}} = \kappa n^* n_v, \quad (11)$$

где κ — коэффициент пропорциональности.²

Таким образом, первоначальное действие силы $F^{(1+)}$ снижает α_{\sim} от максимального значения $\alpha_{\sim \text{max}}$, соответствующего “размагниченному” состоянию (однородному распределению сфер), до значения $\alpha_{\sim 0}$ (рис. 4, з).

Если теперь изменить направление действующей тянущей силы на обратное $F^{(1-)}$ и при этом $|F^{(1-)}| < |F^{(1+)}|$, то не будет реактивности системы до некоторого значения, при котором сферы заднего фронта прямой волны $x_b^{(1+)}$ окажутся способны начать движение (см. рис. 4, б); формирование размытости фронтов обратной волны (размытие фронтов на рисунке не обозначено) приводит к некоторому возрастанию значения $\alpha_{\sim \text{var}}$ (рис. 4, з), однако при дальнейшем увеличении обратной тянущей силы $F^{(1-)}$ обратная волна уплотнения доходит до точки $x_{0n}^{(1+)}$, движение фронта за которую приводит к снижению $\alpha_{\sim \text{var}}$; однородное распределение сфер (“размагниченное” состояние) может быть получено только многократной сменой направления действующей силы F с уменьшением модуля ее значения.

² В более точном рассмотрении необходим учет кривизны поверхности в точке минимума энергии.

На первый взгляд вводимая аналогия кажется далекой от реальных физических процессов при техническом намагничивании материалов. Однако барьерный механизм смещения стенок магнитных доменов и поворота вектора намагниченности [7], а также вариация высот барьеров при эволюционных изменениях в магнитной среде, способная создать аналог размытия волны уплотнения, позволяют надеяться на возможность конструктивного развития введенной модели.

Список литературы

- [1] *Cichocki A., Unbehauen R. Neural Networks for Optimization and Signal Processing.* Teubner; Stuttgart; Chichester; New York; Toronto; Singapore, 1993. 526 p.
 - [2] *Кальнин А.А. // Петербургский журнал электроники.* 1993. № 1. С. 36–54.
 - [3] *Kohonen T. Self-Organization and Associative Memory.* Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1984. 255 p.
 - [4] *Драчев А.Е., Кальнин А.А., Лучинин В.В. // ЖТФ.* 1992. Т. 62. Вып. 12. С. 139–145.
 - [5] *Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах.* М.: Мир, 1985. 420 с.
 - [6] *Николис Дж. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление.* М.: Мир, 1989. 486 с.
 - [7] *Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение. Пер. с яп.* М.: Мир, 1987. 419 с.
-