

12
©1992 г.

ОБУЧАЕМАЯ СЕТЬ НА АДАПТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

А.Е.Драчев, А.А.Кальнин, В.В.Лучинин

Изучен эффект обратимого изменения дифференциальной магнитной проницаемости ферритов под влиянием кратковременно приложенного внешнего магнитного поля. Эффект может быть положен в основу действия физической (невыхислительной) сети с эмпирическим обучением. Приведены экспериментальные свидетельства авторегулирования весовых межэлементных отношений в процессе обучения.

Введение

К середине 90-х годов ожидается смещение интереса от вычислительных сетей к физическим. Соответственно вычислительная адаптационная процедура установления весовых отношений элементов сети уступит место ее прямой физической реализации. Однако на пути создания эффективных физических сетей с параллельной безадресной корректировкой весовых отношений имеется ряд нерешенных проблем. Главной из них является развитие элементной базы физических сетей. Основу сети составляют адаптивные элементы, которые должны обладать тремя свойствами: градируемостью значения физического параметра; сохраняемостью значения параметра в памяти; способностью к адаптивному перераспределению значений градируемого параметра в коллективных взаимодействиях элементов.

Чаще всего в качестве градируемой физической величины использовалась электрическая проводимость, что объясняется стремлением обеспечить регулирование весовых отношений путем изменения межэлементных связностей [1]. Этот период развития сетевых систем, именуемый коннекционизмом, дал различные варианты технического воплощения элемента сетевых систем: сервопотенциометр [2], гальванорезистор (мемистор) [3], МДП транзистор и др. Однако их недостатки очевидны: либо низкое быстродействие, либо неспособность удовлетворить третьему из перечисленных выше требований к элементу — перераспределительному.

Заметим, что проводимость как параметр адаптивных отношений, видимо, неперспективен ввиду трудностей обеспечения эффекта активно-го взаимодействия элементов в процессах адаптации. Прямое действие

физических (термодинамических) сил является первопричиной адаптивного изменения физических величин (перетекания масс, зарядов), изменения проницаемостей (диэлектрической, магнитной), изменения энергопропускания и т.п. Принцип дополнительности физических сил должен быть в основе реализации физической адаптационной процедуры [4,5], в то же время структурная иерархия в процессах адаптации обеспечивает важнейшее качество — избирательное отношение системы к сигнальным воздействиям [6].

В настоящей работе предложено использовать управление дифференциальной магнитной проницаемостью в качестве основы создания адаптивного магнитного элемента сетевой системы. На простом примере сети с фрагментарными включениями адаптивных магнитных элементов демонстрируется перераспределительное свойство, позволяющее производить безадресную коррекцию весовых отношений в процессе обучения сети условной ответной реакции.

Магнитная проницаемость как градируемый параметр

Анализу был подвергнут магнитный материал с “прямоугольной” петлей гистерезиса марки 0.44-ВТ, используемый для изготовления элементов дискретной (бинарной) памяти. Однако в нашем случае производилось исследование остаточной дифференциальной магнитной проницаемости μ_{\sim} , измеряемой на малом переменном сигнале после действия намагничивающегося поля H .

Измерения производились на кольцевых сердечниках на частоте $f_0 = 2$ МГц. Для управления проницаемостью μ_{\sim} кратковременно пропускался ток через отдельную дополнительную обмотку от генератора тока. Вычисление параметра μ_{\sim} производили по обычной формуле

$$\mu_{\sim} = \frac{\pi L(D+d)}{\mu_0 w^2 h(D-d)},$$

где L — индуктивность; D, d — наружный и внутренний диаметры кольцевого сердечника; h — высота сердечника; w — число витков обмотки; μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость.

Полученные данные представлены на рис. 1. Как видно, значение μ_{\sim} после действия управляющего поля H при одностороннем его увеличении (условно положительное направление) для различных образцов изменяется в сторону его уменьшения в 3–5 раз. Изменение направления действия управляющего поля дает характерный экстремум μ_{\sim} , причем крутизна нарастания и высота экстремума зависят от меры предварительной намагниченности материала.

Адаптивный магнитный элемент (АМЭЛ)

Возможность управления магнитной проницаемостью μ_{\sim} материала с запоминанием ее значения позволяет создать адаптивный магнитный элемент (АМЭЛ) для физических (невывчислительных) сетей. В этом случае вес элемента сети будет означать его вклад в формирование сигнала условной ответной реакции в виде частичного (парциального) переменного напряжения на элементе различных амплитуды и фазы. Возможность

Рис. 1. Зависимость остаточной дифференциальной магнитной проницаемости μ_{\sim} от кратковременного действия управляющего магнитного поля H .

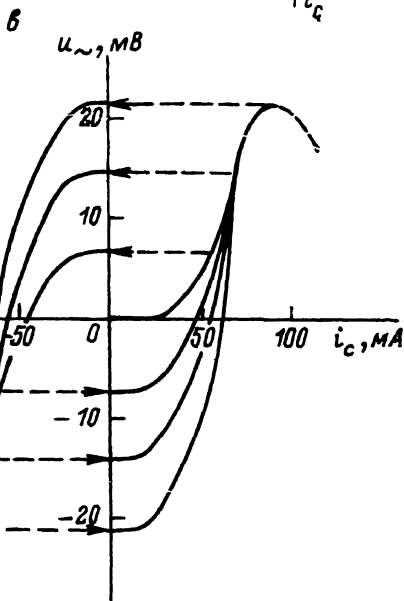
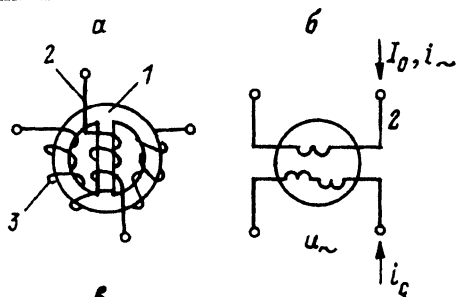
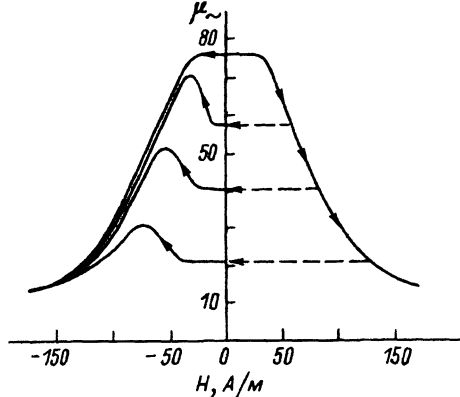


Рис. 2. Конструкция адаптивного магнитного элемента (АМЭЛ).

(1 — ветвящийся магнитопровод; 2 — первичная обмотка для пропускания переменного тока опроса состояния АМЭЛ i_{\sim} и тока подмагничивания I_0 ; 3 — вторичная обмотка для получения сигнала отклика u_{\sim} и пропускания тока управления (коррекции) i_c) (а) и семейство зависимостей напряжения и фазы сигнала отклика от значения тока управления (б). Ток подмагничивания $I_0 = 10$ мА, частота переменного тока опроса $f_0 = 6$ МГц.

изменения фазы решает известную проблему представления отрицательных весов [1].

АМЭЛ представляет собой в простейшем случае сердечник с двумя симметричными замкнутыми ветвями магнитопровода (рис. 2, а). На “стволе” (общей части магнитопровода) имеется обмотка для опроса элемента на малом сигнале, не вызывающем изменений μ_{\sim} и пропускания

тока подмагничивания I_0 , смещающего рабочую точку. Это необходимо для получения обратимого и “симметричного” влияния тока коррекции на значение μ_{\sim} (рис. 1).

Вторичная обмотка имеет равное число витков на обеих ветвях магнитопровода, и, таким образом, наводимая в ней ЭДС сигнала опроса равна нулю при равных значениях μ_{\sim} в ветвях. Однако если через вторичную обмотку пропускается ток управления АМЭЛ (ток коррекции i_c), то при наличии тока подмагничивания в ветвях магнитопровода возникают различные напряженности поля H и соответственно различные μ_{\sim} . Это нарушает симметрию магнитной системы, и на вторичной обмотке появляется сигнал последствия (u_{\sim}), амплитуда и фаза которого зависят от меры этого дисбаланса.

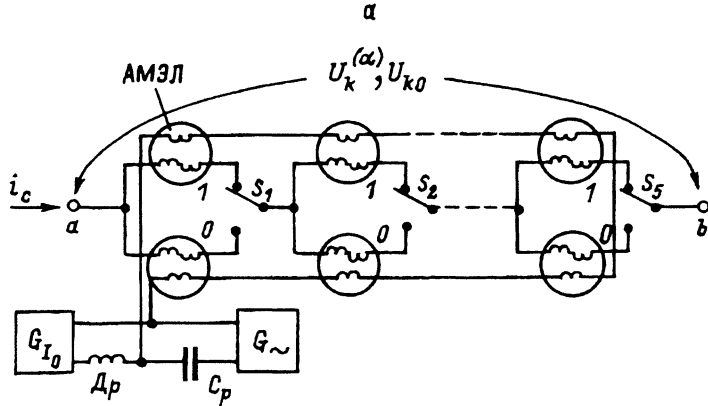
Основная характеристика управления АМЭЛ представлена на рис. 2, б в виде зависимости амплитуды и фазы переменного напряжения u_{\sim} от значения кратковременного пропускаемого тока управления i_c . Изменение фазы означает переход в нижнюю полуплоскость относительно оси абсцисс (“обратная фаза”). Исходным состоянием (0-координата) до включения тока управления было симметричное состояние ветвей магнитной системы с напряженностью поля H_0 , соответствующей току смещения рабочей точки I_0 . Ток подмагничивания устанавливался многими пробными экспериментами для обеспечения максимальной чувствительности элемента и получения равных приращений напряжений отклика на разнонаправленные токовые управляющие воздействия.

Как видно из приведенной зависимости, АМЭЛ позволяет кратковременным токовым действием устанавливать желаемое значение выходного напряжения u_{\sim} . Однако ряд отличительных особенностей АМЭЛ вносит специфические черты в стратегию обеспечения адаптивных отношений элементов в сетевых системах.

Адаптационный процесс в сетевой системе

Перераспределение весов (вкладов) АМЭЛ при обучении условной ответной реакции был изучен на фрагменте сети, в котором реализуется фрагментарная (частичная) связность множества АМЭЛ $\{M_i\}$ с помощью ключей $\{S_j\}$. Фрагмент содержал пять пар АМЭЛ и пять ключей, любые положения которых не прерывают связности сигнальных электродов a - b (рис. 3, а). Фактически сетевой фрагмент являл собой строку обучаемой матрицы с квазиодномерным (без ветвлений) протеканием тока. Сигнал на электродах a - b представлял собой сумму напряжений на сигнальных обмотках АМЭЛ в конкретной $\{S_k\}$ ключевой ситуации, содержащей набор двоичных признаков 0 и 1, что представляет собой входной образ-стимул. Ответная реакция отклика на электродах a - b могла быть “воспитана” в системе путем многократных циклических демонстраций ключевого образа $\{S_k\}$ и возбуждений требуемой ответной реакции — амплитуды и фазы переменного напряжения U_{k0} на электродах a - b путем кратковременного (импульсного) действия тока коррекции i_c .

Стратегия обучения сети строилась с учетом трех особенностей АМЭЛ: наличия гистерезиса на функции отклика $u_{\sim}(i_c)$; существования предельной амплитуды отклика на токовые воздействия $u_{\sim\max}$; зависимости приращения сигнала отклика АМЭЛ Δu_{\sim} от “предыстории” при одинаковом приращении тока коррекции Δi_c .



б

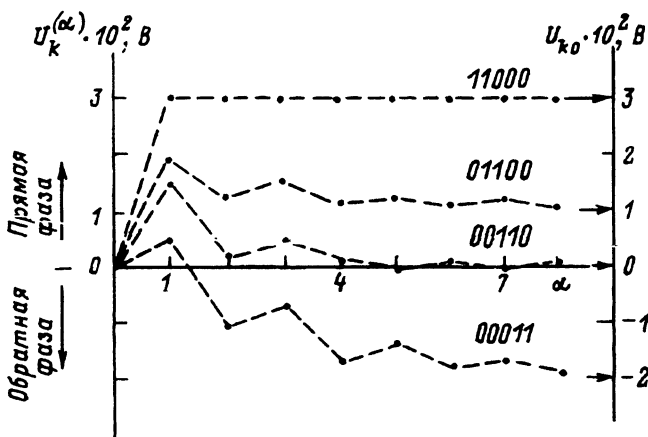


Рис. 3. Фрагмент физической (невчислительной) сети с обучением на адаптивных магнитных элементах (а) и эволюционная диаграмма амплитуд и фаз переменного напряжения отклика $U_{k0}^{(\alpha)}$ (б) (α — номер цикла демонстраций) для разных ключевых комбинаций (цифры у кривых).

Видно постепенное с каждым циклом устремление напряжения отклика с заданным эталонным значениям U_{k0} , обозначенным на оси справа. Ключевой образ 11000 в каждом цикле демонстрировался последним.

Первая из названных особенностей означает необходимость реверса тока коррекции для варьирования напряжением на выходных электродах, хотя сам сигнал при этом может не изменять фазу.

Вторая особенность означает варьирование весов всех элементов, включенных в цепь $a-b$ при больших токах управления, что фактически означает стирание следов записи сигналов от предшествующих действий i_c .

Третья особенность означает возможность “консервирования” состояния АМЭЛ пропусканием относительно большего тока i_c . Вообще возникает своеобразная иерархия чувствительности АМЭЛ в сетевой системе к одинаковому уровню корректирующего воздействия. Это свойство явно видно из характеристик отклика АМЭЛ (рис. 2,б).

При действии быстроизменяющегося тока коррекции следует также принять во внимание перераспределение μ_{\sim} , обусловленное возникновением ЭДС самоиндукции.

Целью любой стратегии обучения является коррекция ошибок сигнала реакции $\Delta U_k^{(\alpha)}$ на k -ключевой образ-стимул (α — номер цикла демонстрации). Сигнал условной реакции есть сумма частичных напряжений на АМЭЛ, связывающих выходные электроды a - b ,

$$U_k^{(\alpha)} = \sum_{i=1}^n u_{\sim i}^{(\alpha)}, \quad (1)$$

где n — число элементов в последовательном подключении, i — номер АМЭЛ в цепи.

Если U_{k0} есть эталонное значение сигнала отклика сети, то сигнал ошибки $\Delta U_k^{(\alpha)}$ есть разница фактического и эталонного значений

$$\Delta U_k^{(\alpha)} = U_k^{(\alpha)} - U_{k0}. \quad (2)$$

Исследования показали, что стратегия обучения с коррекцией ошибки в каждой последовательной демонстрации до нулевого значения путем постепенного увеличения импульсов тока коррекции i_c в соответствующем направлении дает в ряде случаев циклирование ошибки, т.е. ее возобновление. В связи с этим были использованы две стратегии, учитывающие перечисленные выше особенности реакций АМЭЛ на сигнал коррекции: а) “от сильного к слабому”, б) “упреждение” (избыточная коррекция).

Стратегия а) полагает вначале коррекцию только сигналов больших ошибок $\Delta U_k^{(\alpha)}$ по правилу

$$\Delta U_k^{(\alpha)} \xrightarrow{i_c} 0, \text{ если } |U_k^{(\alpha)}| \geq \xi \frac{U_{\max}}{\alpha};$$

$$\Delta U_k^{(\alpha)} \rightarrow \text{без коррекции, если } |U_k^{(\alpha)}| < \xi \frac{U_{\max}}{\alpha}, \quad (3)$$

где U_{\max} — максимально возможная амплитуда напряжения отклика с учетом “сигмоидального” характера реакции АМЭЛ на ток коррекции i_c , α — номер последовательной демонстрации, ξ — экспериментально подбираемый коэффициент.

С возрастанием α порог, начиная с которого корректируется ошибка, снижается и коррекции подвергаются все более слабые сигналы отклика.

Стратегия б) полагает в своей основе дозированную перекоррекцию (перерегулирование) согласно правилу

$$\Delta U_k^{(\alpha)} \xrightarrow{i_c} \left(-\frac{\Delta U_k^{(\alpha)}}{m} \right), \quad (4)$$

где m — коэффициент перерегулирования, минус в выражении означает изменение фазы на обратную.

Фактически эта стратегия есть упреждение появления ошибки циклирования.

Типичная картина эволюционного изменения амплитуды и фазы сигнала ответной реакции сети на совокупность признаков "да-нет" (ключевой образ $\{S_k\}$) представлена на рис. 3,б.

Как видно из приведенной эволюционной диаграммы, сигнал отклика $U_k^{(\alpha)}$ сложным образом устремляется к эталонным значениям U_{k0} с каждым циклом демонстраций. При этом была использована стратегия упреждения б.

Заключение

Как показало данное исследование, АМЭЛ имеет ряд выгодных отличий от "традиционных" адаптивных элементов, упомянутых во Введении, прежде всего это сочетание высокого быстродействия и энергонезависимости памяти действия. Процедура коррекции весов параллельна и безадресна. Последнее весьма важное качество позволяет перейти к макроскопическому контролю состояния сети, не интересуясь состоянием ее отдельных элементов. При больших количествах элементов, составляющих сеть, последняя может быть образована по статистическому принципу (случайные соединения АМЭЛ), может иметь элементное резервированное для повышения ее надежности.

Видимо, целесообразно изучить другие магнитные материалы в ключе данного исследования, возможен также технологический поиск материалов, наиболее подходящих для реализации АМЭЛ.

Авторы выражают свою признательность В.П. Мирошкину и Л.Н. Гарькину за конструктивную дискуссию по материалам данного исследования.

Список литературы

- [1] *Kohonen T.* Self-organization and Associative Memory. Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer Verlag, 1984. 255 p.
- [2] *Widrow B.* // Self-organizing Systems / Ed. by W.S.Yovits, G.T.Jacobi, G.D.Goldstein. Washington: Spartan Books, 1962. P. 435.
- [3] Введение в молекулярную электронику / Под ред. Н.С.Лидоренко. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 56.
- [4] *Hacken H.* // Z. Phys. B. Condensed Matter. Vol. 71. P. 521-526.
- [5] *Кальнин А.А., Томе Б.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 12. С. 122-129.
- [6] *Николис Дж.* Динамика иерархических систем. Эволюционное представление. М.: Мир, 1989. С. 253.

С.-Петербургский государственный
электротехнический университет

Поступило в Редакцию
6 июля 1992 г.