

А. В. Воробьев

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНИЗОТРОПНОГО МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ

Предлагается анализ анизотропного магниторезистивного эффекта, наблюдаемого в тонких пермалловых магнитных пленках, синтезируется обобщенная математическая модель АМР-датчика. АМР-эффект; АМР-датчик; магниторезистор; тонкие магнитные пленки

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что современная промышленность располагает достаточно широким рядом информационно-измерительных устройств и систем, построенных на базе различных магниторезистивных эффектов, как следствие, с той или иной точностью обеспечивая регистрацию параметров магнитных полей в некотором амплитудно-частотном диапазоне. Среди упомянутых магниторезистивных эффектов в первую очередь следует выделить следующие:

- физический и геометрический эффекты магнитосопротивления;
- гигантский магниторезистивный эффект (GMR-эффект);
- магниторезистивный эффект спин-зависимого туннелирования (SDT-эффект);
- анизотропный магниторезистивный эффект (АМР-эффект).

Из представленных эффектов магнитосопротивления, в настоящее время наибольшее распространение в области построения прецизионных магнитных датчиков, получил АМР-эффект. Такая ситуация, в первую очередь, связана со следующими, присущими этим датчикам качествами:

- высокая разрешающая способность ( $\Delta B = 2,7$  нТл);
- высокий показатель чувствительности ( $\gamma = 4$  мВ/В/Тл· $10^{-4}$ );
- линеаризованная выходная характеристика датчика в рабочем диапазоне;
- чувствительность к знаку измеряемого магнитного поля;
- относительно широкий частотный диапазон ( $f = 0$ – $1000$  Гц);

- широкий диапазон рабочих температур ( $-55...+150$  °С);

- низкое сопротивление ( $R \sim 850$  Ом), что, согласно выражению (1), минимизирует тепловой шум магниторезистивного преобразователя:

$$F_T(\omega) = 4kTR, \quad (1)$$

где  $F_T(\omega)$  – спектральная плотность теплового шума магниторезистора (постоянная в широком диапазоне частот);  $R$  – сопротивление магниторезистора;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная рабочая температура;  $\Delta f$  – рабочий частотный диапазон.

Кроме этого, к преимуществам АМР-датчиков стоит отнести: малые массогабаритные показатели, высокую технологичность производства, относительно низкую стоимость, а также высокие показатели надежности и срока эксплуатации.

Все перечисленное выгодно выделяет этот тип магнитных датчиков среди аналогичных устройств и значительно расширяет области и перспективы их применения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Хотя анизотропный магниторезистивный эффект известен достаточно давно, серийное производство датчиков на его основе, с заявленными выше характеристиками, освоено промышленностью не далее, как в последнее десятилетие. По этой, и ряду других причин, на сегодняшний день имеется лишь ряд разрозненной информации, причем преимущественно на иностранных языках, количественно характеризующей технико-метрологические показатели АМР-сенсоров конкретной модели. Наличие же специализированной литературы по данной тематике не обнаружено. Очевидно, что такое положение дел, существенно затрудняет специалистам в области измерительной аппара-

туры процесс разработки ИИС, построенных на базе АМР-элементов.

В связи с этим, целью настоящей статьи, прежде всего, является анализ и систематизация знаний, касающихся первичных измерительных АМР-преобразователей, синтез адаптированной для инженерных расчетов математической модели их работы, требуемой при проектировании и построении магнитометрических ИИС на их основе.

### ТОНКИЕ МАГНИТНЫЕ ПЛЕНКИ

Сегодня в области построения магнитометрических ИИС, с целью увеличения быстродействия, помехоустойчивости, а также чувствительности магнитных сенсоров, магниточувствительные элементы датчиков, как правило, изготавливают из тонких слоев ферромагнитных сплавов (преимущественно пермаллоев).

Здесь под тонким магнитным слоем понимается такая толщина магнитомягкого материала, по которой может располагаться лишь один магнитный домен. При этом однодоменность по толщине не означает однодоменности по всей площади пленки, хотя в некоторых случаях и не исключает этого (рис. 1).

Таким образом, толщина тонких пленок, используемых в качестве рабочего тела сенсорных элементов, колеблется (в зависимости от материала и реализуемого эффекта) от единиц до сотен нанометров.

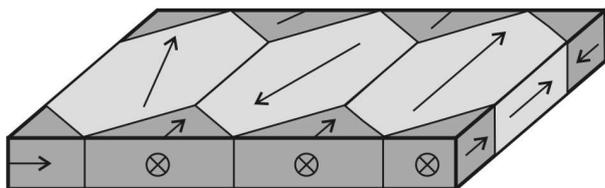


Рис. 1. Доменная структура размагниченной тонкой магнитной пленки

Помимо всего прочего, важным преимуществом использования тонкопленочных магнитных элементов является возможность применения для их изготовления единой пленочной технологии – одного из перспективных направлений микроминиатюризации электронной аппаратуры.

### АНИЗОТРОПНЫЙ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ

Известно, что структура и магнитные свойства тонких анизотропных слоев ферромагнетика (рис. 1) могут существенно отличаться

от свойств относительно толстых слоев и массивных материалов.

Одним из физических проявлений вышеуказанного является тот факт, что сопротивление тонкой ферромагнитной пленки, измеренное вдоль оси ее преимущественной намагниченности, оказывается несколько выше сопротивления пленки, измеренного вдоль оси, перпендикулярной вектору преимущественной намагниченности (2). Причиной этого служит спин-орбитальное взаимодействие электронов, т. е. взаимодействие частиц, зависящее от величин и взаимной ориентации их орбитального и спинового моментов количества движения и приводящее к так называемому тонкому спин-зависимому рассеянию электронов, при этом коэффициент рассеяния для спинов сонаправленных и противоположенных по отношению к намагниченности образца будет различный:

$$R_{\text{пар}} > R_{\text{перп}} \Rightarrow \Delta R = (R_{\text{пар}} - R_{\text{перп}}) > 0, \quad (2)$$

Тот факт, что элементы  $R_{\text{пар}}$  и  $R_{\text{перп}}$  не равны, означает, что сопротивление зависит от взаимной ориентации тока и намагниченности. Разница сопротивлений  $\Delta R = R_{\text{пар}} - R_{\text{перп}}$  и называется анизотропным магнитосопротивлением (естественно, что при температуре выше точки Кюри анизотропный магниторезистивный эффект исчезает).

Сопротивление тонкопленочного образца, в виде прямоугольного параллелепипеда в намагниченном состоянии, при условии отсутствия внешнего магнитного поля определится согласно выражению [1]:

$$R_{B=0} = \left( \frac{2R_{\text{перп}} + R_{\text{пар}}}{3} \right) + \left( \cos^2(\beta) - \frac{1}{3} \right) \Delta R. \quad (3)$$

где  $\beta$  – угол между током  $i$  и намагниченностью  $J$ .

В объемном материале, если намагниченность доменов ориентирована случайным образом и при отсутствии внешнего магнитного поля (т.е. случай полностью размагниченного образца), величина  $\cos^2(\beta)$  в выражении (3) равна  $1/3$ , а следовательно, сопротивление анизотропного магниторезистивного элемента определится как:

$$R_{J=0} = \frac{2}{3} R_{\text{перп}} + \frac{1}{3} R_{\text{пар}}.$$

Таким образом, при насыщении в продольном поле ( $\cos^2\beta = 1$ ) анизотропное магнитосопротивление достигает величины, определяемой выражением (4), а при насыщении в поперечном поле ( $\cos^2\beta = 0$ ) – величины, определяемой выражением (5):

$$R_{J\_продольное} = \frac{2}{3}R_{\text{пар}} + \frac{1}{3}R_{\text{перп}}; \quad (4)$$

$$R_{J\_поперечное} = \frac{1}{3}R_{\text{пар}} - \frac{1}{3}R_{\text{перп}}. \quad (5)$$

Относительное изменение сопротивления АМР-элемента определится согласно выражению (6):

$$\frac{\Delta R_{\text{max}}}{R_{J=0}} = \frac{R_{\text{пар}}}{\frac{1}{3}R_{\text{перп}}} - \frac{R_{\text{перп}}}{\frac{2}{3}R_{\text{пар}}}. \quad (6)$$

где  $R_{J=0}$  – сопротивление магнитной пленки при отсутствии направления преимущественной намагниченности.

Обычно для базовой конструкции АМР-элемента относительное изменение сопротивления не большое, и составляет порядка 4,2 % для сплава (82 % Fe, 18 % Ni), и 3 % для сплава (81 % Fe и 18 % Ni).

Говоря о процессе намагничивания тонких магнитных пленок, стоит отметить, что он протекает различно в зависимости от их строения и скорости нарастания внешнего поля.

В относительно слабых полях перемагничивание происходит преимущественно за счет смещения границ плоских доменов, в более сильных – в результате некогерентного (неоднородного, т. е. как по, так и против часовой стрелки) вращения вектора намагниченности отдельных плоских доменов пленки, вследствие дисперсии (отклонения от преимущественного) направления осей легкого намагничивания этих доменов.

В однородной пленке перемагничивание протекает путем когерентного (однородного) вращения вектора намагниченности всей пленки, представляющей единый плоский домен.

Таким образом, результирующее магнитное состояние образца определяется как внешним приложенным к образцу полем  $H$ , так и внутренним полем молекулярных токов, которое характеризуется намагниченностью  $J$  – напряженностью, создаваемой микротоками электронных оболочек вещества:

$$B = \mu_0(H + J).$$

В общем случае векторы  $H$  и  $J$  не совпадают по направлению в пространстве. В тонкопленочном элементе их можно считать произвольно ориентированными относительно осей легкого и трудного намагничивания, но расположенными всегда в плоскости пленки.

Приложенное внешнее магнитное поле  $H$  поворачивает вектор намагниченности пленки  $J$  на угол  $\beta$ . Значение  $\beta$  зависит от направления и величины внешнего поля. При этом сопротивление пермаллоевой пленки можно оценить согласно выражению (7) при условии, что  $H \ll H_0$  [2].

$$R = R_0 + \Delta R \left( 1 - \frac{H^2}{H_0^2} \right) = R_0 + \Delta R \cos^2 \beta, \quad (7)$$

где  $R_0$  – сопротивление пермаллоевой пленки вне действия магнитного поля;  $\Delta R$  – максимальное возможное изменение сопротивления;  $H$  – измеряемое поле;  $H_0$  – подмагничивающее поле;  $\sin \beta = H/H_0$ .

Из выражения (7) легко заметить, что сопротивление АМР-элемента квадратично зависит от слагаемого  $(H/H_0)$  при  $H_0 = \text{const}$ . Такая квадратичная зависимость отдаляет выходную характеристику сенсора от желаемого линейного вида (рис. 2, в).

В значительной мере лианеризовать выходную характеристику АМР-датчика возможно, путем задания так называемой «зазубренной» структуры, схематически представленной на рис. 2, б. В этом случае сопротивление датчика будет определяться соотношением (8). Теслаомные характеристики для базового АМР-элемента и для его «зазубренной» модификации представлены на рис. 2, в и рис. 2, г соответственно.

$$R = R_{B=0} + \Delta R_{\text{max}} \cos^2(\beta + 45^\circ). \quad (8)$$

где угол  $45^\circ$  соответствует углу наклона пермаллоевых полосок относительно ориентации АМР-элемента в пространстве (рис. 2, в).

Учитывая, что

$$\cos(\beta + 45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2} (\cos(\beta) - \sin(\beta)).$$

можем записать

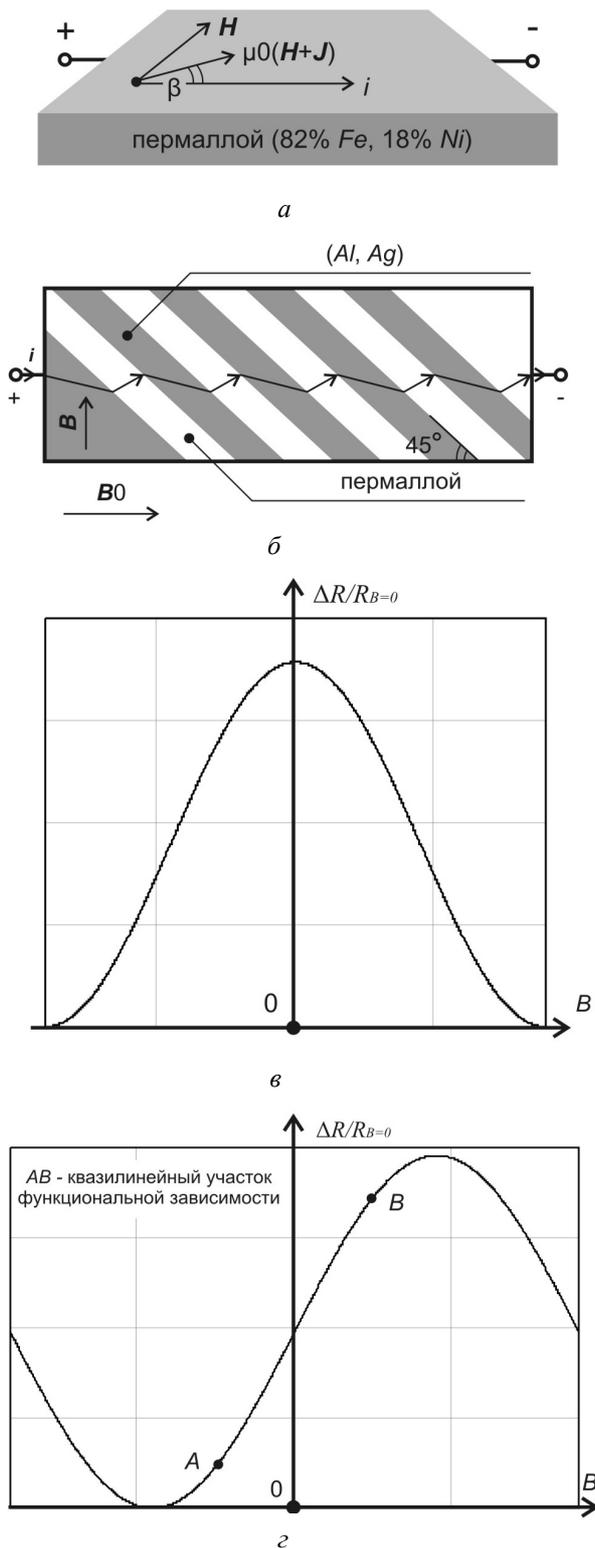
$$R = R_{B=0} \pm \Delta R_{\text{max}} \frac{H}{H_0} \sqrt{1 - (H/H_0)^2}. \quad (9)$$

Знак « $\pm$ » в выражении (9) соответствует одной из возможных ориентаций немагнитных перемычек (рис. 2, б).

В случае, когда  $H \ll H_0$  выражение (9) можно переписать в виде:

$$R \approx R_{B=0} \pm \Delta R_{\text{max}} \frac{H}{H_0}.$$

В результате, очевидно, что функциональная зависимость (10) имеет более предпочтительный квазилинейный характер (рис. 2, г) по сравнению с выражением (7), рис. 2, в.

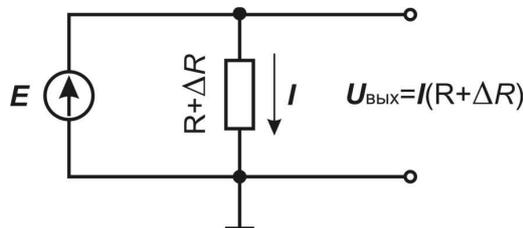


**Рис. 2.** Структуры АМР-элементов и их тесла-омные характеристики: *а* – базовый АМР-элемент; *б* – «зазубренный» АМР-элемент; *в* – тесла-омная характеристика базового АМР-элемента; *г* – тесла-омная характеристика «зазубренного» АМР-элемента

**СХЕМОТЕХНИКА АНИЗОТРОПНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ**

Рассмотренные АМР-преобразователи – в частности и резистивные измерительные преобразователи вообще – являются одним из наиболее распространенных типов устройств, используемых в ИИС в качестве первичных измерительных преобразователей. В данном случае, наиболее очевидным методом измерения сопротивления, является метод, заключающийся в пропускании постоянного тока через имеющийся резистивный элемент с последующим измерением падения напряжения на нем (рис. 3).

При подобном схемотехническом подходе к косвенной оценке сопротивления, крайне важно обеспечивать как точное удержание тока возбуждения, так и точное измерение выходного напряжения. При этом мощность, рассеиваемая на резистивном датчике должна быть достаточно малой во избежание ошибок, связанных с саморазогреванием (соответствовать техническими условиями эксплуатации, установленным производителем) чувствительного элемента. Следовательно, номинал тока возбуждения необходимо минимизировать.



**Рис. 3.** Использование источника постоянного тока для косвенного изменения сопротивления

Именно по этой причине на более высоком схемотехническом уровне АМР-датчики представляют собой четыре эквивалентных «зазубренных» магниторезистора, сформированных путем осаждения тонкого слоя пермаллоя на кремниевую пластину в форме квадрата соединенных по схеме, представляющей из себя плечи измерительного моста Уитстона (рис. 4).

Такой мост находится в нулевом (сбалансированном) состоянии при соблюдении условия  $R1 / R4 = R2 / R3$ , вне зависимости от способа его возбуждения (постоянным либо переменным током), величины возбуждения или способа считывания выходного сигнала (ток или напряжение), импеданса схемы измерения. Пара-

метры выходного сигнала определяются в соответствии с выражением (11).

$$U_0 = \left( \frac{R1}{R1 + R4} - \frac{R2}{R2 + R3} \right) U_{вх} = \frac{\frac{R1}{R4} - \frac{R2}{R3}}{\left( 1 + \frac{R1}{R4} \right) \left( 1 + \frac{R2}{R3} \right)} U_{вх}, \quad (11)$$

причем, если  $R1 / R4 = R2 / R3$ ,  $U_0 = 0$ .

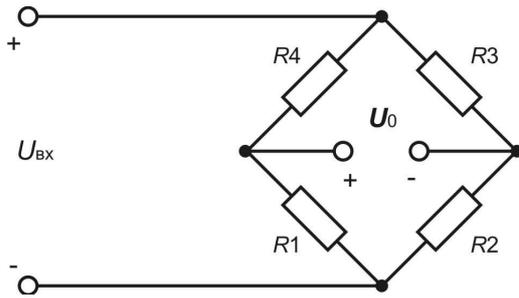


Рис. 4. Включение резистивных измерительных преобразователей по мостовой схеме

Максимального сигнала на выходе, а также линейной связи между выходом моста и изменением величины чувствительности резистора (отношение максимально ожидаемого изменения выходного напряжения к напряжению возбуждения), можно добиться, используя мостовую топологию соединения АМР-элементов, представленную на рис. 5.

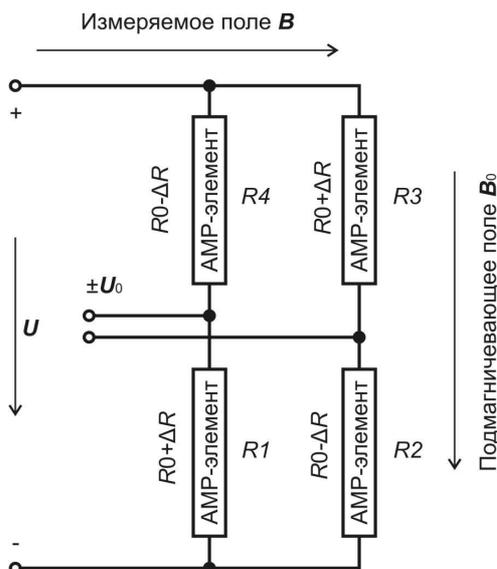


Рис. 5. Мостовая схема соединения АМР элементов и характер функциональной зависимости выходного сигнала от вариаций измеряемого магнитного поля

Чувствительность и коэффициент нелинейности такого измерительного моста, определяются в соответствии с выражением:

$$S = U_{вх} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]; \quad \gamma = 0 \frac{\%}{\%}, \quad (12)$$

где  $S$  – чувствительность моста;  $\gamma$  – коэффициент нелинейности.

### СИНТЕЗ ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АМР-ДАТЧИКА ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ

Принимая во внимание выражения (9), (10), (11), рис. 5 и полагая, что АМР-элементы магнитного датчика ориентированы таким образом, что  $R1 = R3 = R_0 + \Delta R$ , а  $R2 = R4 = R_0 - \Delta R$ , подставляя выражение (9) в выражение (11) и приводя подобные члены, можем записать:

$$U_0 = 2U_{вх} \frac{\Delta R_{\max}}{H_0} \sqrt{1 - (H/H_0)^2}. \quad (13)$$

При условии, что  $H \ll H_0$  и  $\mu = 1$ , выражение (13) можно переписать в виде:

$$U_0(H) = 2U_{вх} \frac{\Delta R_{\max}}{H_0} H$$

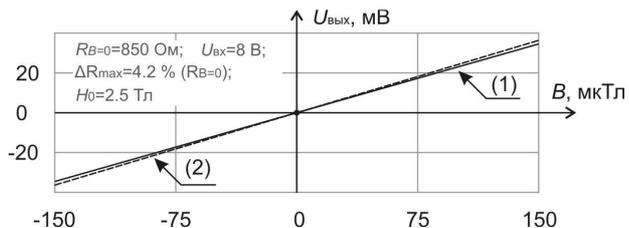
или

$$U_0(B) = 2U_{вх} \frac{\Delta R_{\max}}{B_0} B. \quad (14)$$

Из выражения (14) очевидно, что помимо того, что оно линейно по своей природе, выходной сигнал прямопропорционально зависит от напряжения питания моста, напряженности измеряемого поля  $H$ , и чувствителен к знаку поля.

Далее, задаваясь целью верификации полученной математической модели, подставим численные значения характеристик одного из АМР-сенсоров, выпускаемых серийно (например, НМС1001), и сравним полученную графическую зависимость напряжения на выходе датчика от прилагаемого к нему воздействия магнитного поля (прямая (1), на рис. 6) с аналогичной графической зависимостью, предоставляемой фирмой производителем (прямая (2), на рис. 6).

Некоторые расхождения, наблюдаемые на рис. 6, могут быть объяснены округлением численных значений характеристик, публикуемых фирмой-производителем (например, номинального сопротивления) АМР-элемента.



**Рис. 6.** Сопоставление полученных результатов с известными техническими характеристиками АМР-элемента

### ВЫВОД

Таким образом, предложенная математическая модель адекватно описывает поведение АМР-датчиков, построенных по мостовой топологии, учитывает при этом все основные процессы, протекающие в АМР-пленках и отличается лаконичной формой записи, что упрощает

ее применение в процессе проектирования и отладки магнитометрических ИИС, построенных на базе АМР эффекта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукашевич М. Г. Введение в магнитоэлектронику. Минск: издательство БГУ, 2003. С. 39–40.
2. Ripka P., Turek A. Modern Sensors. London: ISTE ltd, 2007. P. 439–443.

### ОБ АВТОРАХ

**Воробьев Андрей Владимирович**, доц. каф. электроники и биомедицинских технологий. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. магнитометрических ИИС.