

УДК 620.179

СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФЕРРОЗОНДОВЫХ МАГНИТОМЕТРОВ

И.В. Брякин

Рассматриваются особенности возникновения фактора ложных сигналов в феррозондовых магнитометрах (ФМ) и возможности его минимизации в рамках "дислокационной" модели. Обосновывается новый способ снижения и стабилизации уровня ложных сигналов в ФМ, основанный на эффектах магнитоупругого взаимодействия.

Ключевые слова: анизотропия; акустическая волна; дислокация; доменная граница; магнитное поле; магнитоупругое взаимодействие; магнитоstriction; ложный сигнал; пьезоэлемент; феррозондовый магнитометр.

THE MODES STABILIZATION OF REGIMES
OF FUNCTIONING THE FLUX-GATE MAGNETOMETERS

I. V. Bryakin

The work considers the features of occurring factor of false signals in the flux-gate magnetometer (FGM) and possibilities of its minimization in the framework "dislocation" model. The new way of decrease and stabilization of false signals level in FGM, based on effects magnetoelastic interactions is proved.

Keywords: anisotropy; acoustic wave; disposition; domain border; magnetic field; magnetoelastic interaction; magnetostriction; a false signal; piezoelectric element; flux-gate magnetometer.

Введение. Среди многообразия различных типов датчиков особое место занимают магнитометрические преобразователи, предназначенные для измерения параметров магнитных полей и широко используемые при контроле качества различных видов промышленных изделий и материалов, поиске природных ресурсов, изучении пространственно-временной структуры магнитного поля Земли и планет, ориентировании и определении местонахождения различных подвижных объектов в поле Земли [1].

При реализации различных способов регистрации магнитных полей, большинство из которых основано на тесной связи между магнитными и электрическими явлениями, наиболее перспективным является применение обширного класса датчиков феррозондового типа или так называемые феррозондовые магнитометры (ФМ), ориентированные на измерение физических величин при использовании в качестве рабочей среды магнитного поля [2].

ФМ характеризуются не только достаточно высокой чувствительностью, но и возможностью

непосредственного измерения составляющих вектора магнитного поля, обеспечивая получение полной информации о структуре поля и его источниках. Они могут работать в очень слабых магнитных полях, в широком температурном диапазоне и при наличии электромагнитных помех, отличаются высокой надежностью, долговечностью и низкой стоимостью.

Одним из основных факторов, влияющим на точность и чувствительность ФМ, является временная нестабильность нулевого сигнала (ложного сигнала), которая определяется в основном изменением поля возбуждения, изменением частоты возбуждения и сползанием нуля во времени.

Следует отметить, что развитие ФМ происходит по двум основным направлениям: технологическое (качественное), т. е. улучшение параметров уже известных типов при заметном увеличении отношения качество-стоимость, и структурное, т. е. разработка преобразователей, основанных на принципиально новых физических явлениях.

Обычно для минимизации фактора ложного сигнала уменьшают длину измерительной катушки

по сравнению с длиной сердечников; используют обмотки возбуждения и катушки компенсации, создающие более однородные поля; увеличивают длины разомкнутых сердечников с целью получения в их центральной части более однородного магнитного потока.

Как показывает практика, метод подобного технологического улучшения параметров ФМ объективно имеет существенные ограничения. Поэтому исследование возможности применения новых физических явлений при разработке принципов построения ФМ с улучшенными техническими характеристиками, весьма актуально, и будет способствовать развитию новых методов и средств измерения, контроля и технической диагностики [3, 4].

Анализ механизмов возникновения ложного сигнала. Опыт свидетельствует, что на выходе ФМ всегда присутствует ложный сигнал, имеющий ту же частоту, а в ряде случаев – и фазу, что и полезный. Если уровень ложного сигнала в течение длительного времени сохраняется неизменным, то говорят о смещении или сдвиге нуля феррозонда. При медленном изменении уровня ложного сигнала подразумевается дрейф или медленные (инфранизкочастотные) флуктуации нуля. В случае проявления ложного сигнала в виде быстропротекающего, хаотичного процесса, характеризующегося широким сплошным спектром – имеются ввиду шумы феррозонда [2].

Существует ряд “источников”, ответственных за появление ложного сигнала, часть из которых находится вне феррозонда. Это, прежде всего, генератор возбуждения, всегда вырабатывающий четные гармоники тока; цепь удвоения частоты, питающая синхронный детектор и цепь обратной связи, воспринимающая наводки от разных элементов электронной схемы феррозондового прибора.

Другая часть “источников” ложного сигнала находится внутри ФМ и зависит от особенностей его конструкции и выбранного режима работы.

Рассмотрим три возможных основных характерных механизма возникновения ложного сигнала, относящихся к самому ФМ:

1. Недостаточная степень балансировки полуэлементов ФМ. Данный механизм проявляется, прежде всего, в наличии значительного уровня нечетных гармоник в выходной э.д.с. феррозонда. При различных внешних воздействиях этот уровень может изменяться и быть ответственным за дрейф или флуктуации нуля.
2. Остаточная намагниченность сердечников. Обусловлена явлением гистерезиса и существенно уменьшается при выполнении условия $H_m > (H_m)_{\text{ост}}$ и сводится к минимуму

при $H_m \gg (H_m)_{\text{ост}}$. Для исключения остаточной намагниченности перемагничивание сердечников должно осуществляться по предельной петле гистерезиса, что подтверждает непосредственную связь дрейфа нуля феррозонда с кинетикой временного уменьшения остаточной намагниченности сердечников.

3. Неоднородность магнитных полей (постоянных и переменных) в объеме сердечников и внутри них. Сопровождается появлением на выходе феррозонда квадратурной составляющей э.д.с, т. е. такой составляющей, фаза которой сдвинута на 90° по отношению к синфазной, рабочей составляющей э.д.с., несущей информацию об измеряемом поле. Появление квадратурной составляющей связано с фазовым сдвигом между индукцией и напряженностью поля возбуждения, обусловленным гистерезисом. Если магнитный поток вдоль сердечника неоднороден, например, из-за формы сердечника, то вдоль него изменяются не только парциальные, т. е. относимые к отдельным участкам, коэффициенты преобразования, но и начальные фазы выходной э.д.с. В этом случае уровень квадратурной составляющей э.д.с. и вообще ложный сигнал, как совокупность синфазной и квадратурной составляющих э.д.с., зависят от изменения амплитуды поля возбуждения.

К перечисленным выше характерным механизмам возникновения ложного сигнала можно добавить и явление магнитострикции, заключающееся в изменении линейных размеров ферромагнетика при наложении магнитного поля. В связи с тем, что магнитострикционный эффект является четным, то наложение на ферромагнитный сердечник поля возбуждения вызывает его удлинение с удвоенной частотой. Удлинение сердечника приводит к движению (стягиванию) силовых линий переменного поля, которые пересекают витки надетой на сердечник измерительной катушки дважды за период, и изменению их направления при переходе к каждому следующему полупериоду. Поэтому, наводимая дополнительная э.д.с. будет иметь нечетно-гармонический спектр, хотя периодическое удлинение сердечника и происходит с удвоенной частотой.

Фактически ферромагнетик представляет собой систему с обратной связью, роль которой выполняют, главным образом, дальнотействующие, следовательно, необменные силы, к которым относятся, прежде всего, магнитостатические силы, инициирующие образование доменной структуры и изменяющиеся в той или иной степени после каждой ее перестройки.

В этом случае можно считать, что перестройка доменной структуры происходит в твердом теле со всеми его дефектами внутреннего строения, т. е. включениями, пустотами, микронапряжениями, дислокациями и т. п. Упругое взаимодействие движущихся доменных границ с дефектами, сопровождающееся необратимыми явлениями (скачками Баркгаузена), и расход магнитной энергии вызывают соответствующие изменения ориентации и местоположения дефектов.

Поэтому, одновременно с перестройкой доменной структуры происходит перестройка и дефектной структуры, что сказывается определенным образом при стремлении системы с обратной связью к устойчивому состоянию, т. е. к симметрии динамической петли гистерезиса ферромагнетика. При этом следует отметить существенную разновременность процессов перестройки доменной и дефектной структур. Первая фактически “стирается” и воспроизводится в каждом полуцикле перемагничивания, а вторая изменяется на протяжении многих циклов, поскольку изменение ориентации и местоположения дефектов подчинено “медленным” законам пластической деформации. Этим постулируется “многомасштабный” характер процессов, протекающих в циклично перемагничиваемых ферромагнетиках, который, в конечном счете, и ответствен за появление ложного сигнала.

Мерой взаимодействия между доменной и дефектной структурами ферромагнетика служат константы магнитоэлектрики и магнитной анизотропии.

Так, взаимодействие ДГ с дислокацией описывается выражением Пича–Келлера:

$$p = - \int dl \Gamma'(\hat{\sigma}^M \times b), \quad (1)$$

где p – сила взаимодействия; dl – элемент длины l дислокации; $\hat{\sigma}^M$ – тензор внутренних магнитоэлектрических напряжений, вызванных изменением направлений намагниченности в самой границе; b – вектор Бюргерса.

Известно, что при соответствующем выборе системы координат (ось z ориентируется по нормали к границе) можно пользоваться только тремя компонентами тензора $\hat{\sigma}^M$. Для прямолинейной дислокации, ориентированной параллельно плоскости границы, из выражения (1) следует:

$$p_z = \hat{\sigma}_{11}^M l_y b_x - \hat{\sigma}_{22}^M l_x b_y + \hat{\sigma}_{12}^M (l_y b_y - l_x b_x), \quad (2)$$

где l_i и b_i – компоненты векторов l и b .

Для минимизации силы p_z необходимо уменьшить значения компонент $\hat{\sigma}_{11}^M$, $\hat{\sigma}_{22}^M$ и $\hat{\sigma}_{12}^M$ тензора $\hat{\sigma}^M$. Практически же задача сводится к целенаправленному уменьшению констант магнитоэлектрики λ_{100} и λ_{111} , которым пропорциональны компоненты

$\hat{\sigma}_{11}^M$, $\hat{\sigma}_{22}^M$ и $\hat{\sigma}_{12}^M$. Если основной вклад в мощность шума действительно вносят задержки доменных границ на дефектах, то спектральная плотность э.д.с. шума должна быть пропорциональной объемной плотности дефектов ρ , т. е.

$$\bar{V}_ш \sim \rho^{1/2}. \quad (3)$$

С другой стороны, из приложений теории пластичности материалов к ферромагнетикам следует:

$$H_c \sim \mu_{нач}^{-1} \sim \rho^{1/2}. \quad (4)$$

Поэтому связь $\bar{V}_ш$ с величинами $m_{нач}$ и H_c представляется вполне естественной, т. е. $\bar{V}_ш$ уменьшается с ростом начальной проницаемости $m_{нач}$ и возрастает при увеличении коэрцитивной силы H_c .

Менее заметна связь $\bar{V}_ш$ с величиной индукции насыщения B_s , поскольку последняя относится к структурно-нечувствительным параметрам материала.

В целом, для понимания существа рассматриваемой проблемы, проведем соответствующий анализ процессов взаимодействия доменной и дефектной структур в циклично перемагничиваемых ферромагнетиках.

Поскольку действие равно противодействию, то из выражения (2) следует, что не только дислокация действует на доменную границу с силой p , препятствуя ее движению, но и граница с той же силой, но с обратным знаком, действует на дислокацию. Однако реакция дислокации на это действие более медленная, чем обратная. Дислокации обладают низкой подвижностью, подчиняющейся законам пластической деформации. Скорость движения дислокаций (при малых напряжениях) составляет 10^{-9} м/с и менее. Подобные медленные изменения в дефектной структуре вызывают флуктуации асимметрии динамической петли гистерезиса. Кроме того, в ферромагнетиках существуют асимметричные микрогистерезисные петли [5], причиной существования которых может быть “вентильный эффект”, заключающийся в том, что при прохождении ДГ через дислокацию в ряде случаев возникает новый домен, причем его появление зависит от направления движения границы: если домен возникает при прямом движении границы, то ее обратное движение “сотрет” этот домен. Несмотря на быстрое приспособление доменной структуры к дислокационной, сам факт перестройки последней, характеризующийся “медленным временем”, создает ситуации, когда суммарный “вентильный эффект” на восходящей ветви будет преобладать над таковым на нисходящей ветви динамической петли, что и приведет

к асимметрии петли в виде разных значений положительной и отрицательной коэрцитивных сил.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что дефекты оказывают влияние не только на процессы смещения, но и на процессы вращения и зародышеобразования, наводя при этом соответствующую локальную анизотропию.

Доменные границы, напротив, чрезвычайно подвижны. Поэтому “повторяемость” актов взаимодействия границ с одними и теми же дислокациями на протяжении сотен и тысяч циклов перемагничивания как раз и является физической предпосылкой установления корреляции между скачками Баркгаузена и появлением ложного сигнала.

Результаты анализа физических процессов в ферромагнетике позволяют выдвинуть предположение о том, что уровень ложного сигнала непосредственно связан с двумя такими факторами, как магнитострикция и магнитная анизотропия. Наименьший уровень ложного сигнала достигается именно тогда, когда оба эти фактора минимизируются одновременно, т. е. имеет место уравнивание двух противоположно изменяющихся факторов (магнитострикция насыщения I_s возрастает, а коэффициент прямоугольности V_r/V_s убывает), влияющих на уровень ложного сигнала. Кроме того, результаты анализа свидетельствуют в пользу “дислокационной” модели ложного сигнала, которая позволяет уяснить роль магнитострикции в механизме его возникновения, понять природу корреляции скачков Баркгаузена, разделенных большим числом циклов, природу флуктуации параметров результирующей гистерезисной петли.

Благодаря магнитострикции устанавливаются взаимодействия между элементами доменной и дислокационной структур ферромагнетика, интенсивность которых и определяет уровень ложного сигнала. Поэтому роль магнитострикции фактически можно свести к регулированию этих взаимодействий.

Концепция нового способа стабилизации режимов. Существующие технологические и конструктивные факторы, снижающие уровень ложных сигналов на выходе ФМ, имеют существенные ограничения в плане их технической реализации. Поэтому необходим поиск принципиально новых способов минимизации нулевого дрейфа ФМ, отличающихся простотой реализации и большей эффективностью [6].

Данную проблему предлагается решить, исходя из существования непосредственной связи магнитоупругой энергии ферромагнетика с магнитострикцией и из рассмотренной выше “дислокационной” теории, путем поиска дополнительных

условий, при которых достигается минимизация уровня ложного сигнала ФМ при циклично перемагничиваемых ферромагнетиках.

Исходя из реальности существования эффекта влияния стационарной (фиксированной) доменной структуры феррита на акустическую накачку, можно движущуюся ДГ рассматривать как своеобразную волну возмущения (волну параметра), бегущую в покоящейся среде. В этом случае сильная подвижность, а также большая нелинейность такой магнитной подсистемы будут оказывать значительное влияние на акустические характеристики этих материалов. Здесь, в отличие от большинства случаев релаксационных явлений в акустике, появляются возможности управления характеристиками (временем релаксации и т. д.) с помощью внешних магнитных полей. Индуцирование акустической волной на доменной стенке знакопеременяющихся (с периодичностью, определяемой проекцией волнового вектора падающей волны на ДГ) магнитных полюсов вызывает, в свою очередь, эффективный резонансный отклик магнитной подсистемы посредством полей сопутствующих магнитостатических колебаний [6]. Это сравнительно редко встречающийся в акустике случай резонансного отклика среды, который непосредственно связан со спинами электронов. Фононная и магнитная подсистемы при этом, как правило, слабо связаны. Однако, с одной стороны, в области магнитоакустического резонанса (МАР) эта связь существенным образом увеличивается, а с другой – благодаря высокой добротности спиновой прецессии магнитные возбуждения, имеют достаточно большое время жизни и даже при слабой связи могут оказывать сильное влияние на акустические возмущения [7].

С учетом сказанного выше, можно предположить, что наличие процессов отражения и преобразования акустических мод на доменной структуре магнетиков предопределяет факт существования неоднородных магнитострикционных деформаций в объеме ДГ. При этом, возбуждение колебаний ДГ может вызываться как продольной, так и поперечной акустическими волнами. В любом случае, независимо от типа падающей акустической волны, будут генерироваться вторичные (рассеянные) продольные и поперечные волны по обе стороны от ДГ. Следовательно, при рассеянии волн на границе будут происходить взаимные превращения продольных и поперечных акустических волн.

В случае магнитоупорядоченных сред распространение акустических волн связано с трансформацией волн на доменных границах и возбуждением связанных магнитоупругих колебаний. Для такого процесса необходимо, чтобы упругие

колебания $u(k_n, t)$ сопровождались колебаниями намагниченности

$$DM_u(k_n, t) = \lambda u(k_n, t),$$

где коэффициент λ зависит от величины магнитоупругого тензора b , волнового вектора k_n и разности частот спиновой и упругой волн.

Магнитоупругий механизм возбуждения и преобразования акустических волн наиболее эффективен при условии, что амплитуда колебаний намагниченности будет превосходить саму намагниченность или хотя бы будет сравнима с ней:

$$DM_u(k_n, t) / M_u(k_n, t) = \eta(k_n, t) \gg 1,$$

где η – магнитоупругий коэффициент усиления колебаний намагниченности.

В этом случае, при взаимодействии упругих волн с магнитоупорядоченными средами связь между упругими и спиновыми волнами приводит к образованию, по крайней мере, локально, макроскопически большого числа возбуждений в виде связанных магнитоупругих волн.

Отличительная особенность магнитостатических волн в анизотропных структурах магнитных материалов состоит в их локализации границами раздела сред и способностью эффективно удерживаться ДГ “магнитных кристаллов”. Кроме того, само поведение магнитостатических и спиновых волн на движущихся ДГ рассматривается в магнитодинамике именно в связи с проблемой их устойчивости при внешних воздействиях или поступательном перемещении [8]. В этом случае показательным является факт установления устойчивого режима движения ДГ и характер возмущений, развивающихся по внутренним (структурным) степеням свободы доменных стенок. В отличие от обычных границ раздела сред ДГ могут перемещаться по ферромагнетику под внешним управляющим воздействием как магнитного, так и акустического полей.

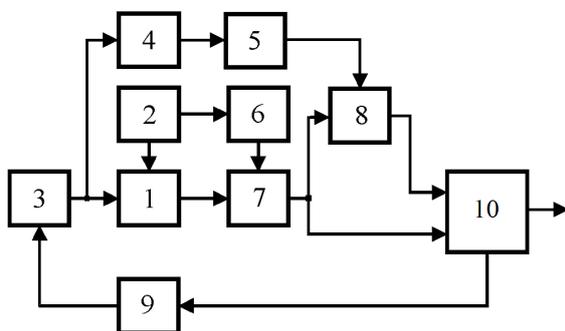


Рисунок 1 – Вариант схематической реализации способа минимизации фактора ложного сигнала

Определенный интерес представляет процесс, известный под названием дезаккомодации магнитной проницаемости. Если достаточно резко изменить положение доменных границ в образце и затем начать измерять его начальную проницаемость m_a как функцию времени, то опыт показывает, что m_a уменьшается. Это можно интерпретировать как результат постепенной стабилизации положения ДГ в данном месте, углубления потенциальной ямы, в которой она находится, и соответствующего увеличения ее крутизны, определяющей величину начальной магнитной проницаемости материала. Это подтверждается соответствующими экспериментами по непосредственному наблюдению за колебательным режимом при установлении равновесного положения ДГ.

Результаты анализа процессов взаимодействия акустических волн с магнитоупорядоченными средами, позволяют предположить существование возможности использования ДГ в качестве элемента, регулирующего процессы перемагничивания ферромагнитного образца и канализирующего магнитостатические (спиновые) волны, генерируемые внешним источником [9]. В этом случае упругое возбуждение магнитоупругой волны в ферромагнитном образце в рассматриваемом варианте ФМ может быть осуществлено, например, с помощью пьезоэлектрического преобразователя – пластины кварца, закрепленной соответствующим образом на торцевой поверхности образца и возбуждающей в нем линейно поляризованное упругое смещение с частотой подведенного к преобразователю электрического напряжения.

Вариант схематической реализации предлагаемого способа минимизации фактора ложного сигнала представлен на рисунке 1, где 1 – феррозондовый магнитометр (ФМ); 2 – генератор электрического напряжения возбуждения ФМ; 3 – генератор акустических волн на базе пьезоэлектрического преобразователя; 4 – акустоэлектрический преобразователь; 5 – формирователь опорного напряжения с частотой акустического возбуждения ФМ; 6 – формирователь опорного напряжения с удвоенной частотой электрического напряжения возбуждения ФМ; 7 и 8 – синхронные детекторы; 9 – блок управления генератором акустических волн; 10 – электронный измерительно-вычислительный модуль.

Заключение. Экспериментальная проверка данного предположения показала, что при воздействии первичной акустической волны с определенными параметрами на ДГ, и обеспечении при этом соответствующего резонансного режима для реализации эффектов магнитоупругого взаимодействия

в ФМ, возможно существенно уменьшить как уровень ложного сигнала, так и его временной дрейф, и тем самым повысить точность преобразования ФМ в 1,5–2 раза.

Предлагаемый способ управления эффектом магнитоупругого взаимодействия в ФМ посредством акустической волны позволит реализовать режим инвариантного функционирования ФМ к дестабилизирующим факторам, и применить простые технические решения для тестовых методов повышения точности измерения контролируемых параметров, что открывает широкие возможности применения структурных методов для рассматриваемого класса датчиков.

Литература

1. *Афанасьев Ю.В.* Феррозондовые приборы / Ю.В. Афанасьев. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 320 с.
2. *Розенблат М.А.* Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники / М.А. Розенблат. М.: Наука, 1984. 767 с.
3. *Брякин И.В.* Магнитодинамический магнитометр для задач дефектоскопии / И.В. Брякин // Мехатроника, автоматизация, управление. Новые технологии. М., 2013. № 3. С. 35–41.
4. *Брякин И.В.* Ферродинамический дефектоскоп / И.В. Брякин // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 1. С. 75–79.
5. *Гуревич А.Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках / А.Г. Гуревич. М.: Наука, 1973. 256 с.
6. *Брякин И.В.* Способ возбуждения феррозондов на основе магнитоэлектрического эффекта / И.В. Брякин // Проблемы автоматики и управления. Бишкек: Илим, 2016. № 2 (31). С. 73–83.
7. *Зарембо Л.К.* Проблемы нелинейной акустодиагностики / Л.К. Зарембо; под ред. Н.Д. Векслера. Таллинн: Валгус, 1986. С. 125.
8. *Гусяцкий Г.Ф.* Магнитные и резонансные свойства магнитных материалов: сб. статей / Г.Ф. Гусяцкий, А.А. Ветров, Э.М. Смокоткин; под ред. Г.А. Петраковского. Красноярск: Ин-т физики СО АН СССР, 1980. С. 171.
9. *Брякин И.В.* Феррозондовый датчик с упругим возбуждением сердечника / И.В. Брякин, Г.С. Денисов // Проблемы автоматики и управления. Бишкек: Илим, 2017. №1 (32). С. 50–59.