

УДК 621.317.44:620.179.1

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ГИГАНТСКОГО МАГНИТНОГО ИМПЕДАНСА ДЛЯ ЗАДАЧ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Марочкин В.С.

студент кафедры энергомашиностроения МГТУ им. Н. Э. Баумана

e-mail: marochkin.ver@gmail.com

Аннотация

Рассмотрены методические подходы к повышению эффективности магнитных измерительных каналов на основе эффекта гигантского магнитного импеданса (ГМИ) применительно к неразрушающему контролю стальных элементов и арматуры строительных конструкций. Проанализированы физические предпосылки ГМИ, структура измерительного тракта, роль высокочастотного возбуждения, магнитного смещения, синхронного детектирования и цифровой фильтрации. Предложены сопоставимые критерии оптимизации: локальная чувствительность, эквивалентный входной магнитный шум, разрешение, линейность, динамический диапазон и пространственная воспроизводимость измерения. Описана методика стендового исследования с калибровочной катушкой и ферромагнитными образцами, а также процедура сравнения методов обработки сигнала с исключением подгонки по контрольным данным. Показано, что снижение выходного шума само по себе не подтверждает улучшения порога обнаружения дефекта: необходимо учитывать изменение полосы, чувствительности и геометрии измерения. Работа имеет обзорно-методический характер; результаты физических испытаний не заявляются.

Ключевые слова: *гигантский магнитный импеданс, магнитный датчик, неразрушающий контроль, арматура, синхронное детектирование, чувствительность, магнитный шум, фильтрация.*

OPTIMIZATION OF GIANT MAGNETOIMPEDANCE MAGNETIC SENSORS FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF BUILDING STRUCTURES

Marochkin V.S.

Student of the Department of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University

e-mail: marochkin.ver@gmail.com

Abstract

The paper examines signal-chain optimization for giant magnetoimpedance (GMI) magnetic sensors intended for non-destructive examination of steel structural members and reinforcing bars. The physical operation of GMI sensing elements, radio-frequency excitation, bias-field selection, synchronous demodulation, filtering and calibration are discussed. A consistent evaluation framework is proposed using field sensitivity, equivalent magnetic noise, resolution, linearity, measurement bandwidth and spatial repeatability. A bench-top protocol with a reference coil and ferromagnetic test specimens is outlined. Different signal-processing strategies are compared conceptually without attributing invented numerical performance figures to physical experiments. The limitations arising from lift-off, remanent magnetization, electromagnetic interference and sensor positioning are highlighted.

Keywords: *giant magnetoimpedance, magnetic sensor, nondestructive testing, reinforcing steel, lock-in detection, sensitivity, magnetic noise, digital filtering.*

Введение

Магнитные методы неразрушающего контроля применяются при обследовании ферромагнитных элементов строительных конструкций, в том числе арматуры железобетона, стальных закладных деталей и соединений. Измерение локальных искажений магнитного поля позволяет обнаруживать неоднородности и отслеживать изменение состояния объекта, однако

измеренный сигнал определяется не только возможным дефектом, но и магнитной предысторией материала, зазором между датчиком и поверхностью, ориентацией изделия и фоном от внешнего оборудования. Поэтому требование к датчику должно формулироваться через характеристики всей измерительной системы, а не через паспортную чувствительность отдельного элемента.

Эффект гигантского магнитного импеданса обусловлен резким изменением комплексного импеданса магнитомягкого проводника при изменении внешнего поля. Классическая работа Л. В. Паниной и К. Мори связывает наблюдаемую зависимость со скин-эффектом и магнитной проницаемостью аморфной проволоки [1]. Последующие исследования показали, что характеристики ГМИ-датчика определяются режимом высокочастотного возбуждения, магнитной анизотропией и способом выделения информативного отклика [2-4].

Практически важен вопрос: может ли модернизация электронной обработки улучшить обнаружение слабых магнитных аномалий без изготовления нового сенсора? Для ответа недостаточно оценить видимую гладкость зарегистрированной кривой. Следует сопоставить шум в пересчете на входное поле, сохранение амплитуды сигнала от известного эталона, временное разрешение и воспроизводимость при многократном сканировании. Цель настоящей работы – предложить воспроизводимую методику выбора параметров измерительного и цифрового тракта ГМИ-датчика для контроля строительных конструкций.

В качестве ГМИ-элемента применяют аморфную проволоку, микропровод или тонкопленочную магнитомягкую структуру. Через такой элемент пропускают переменный ток повышенной частоты, после чего фиксируют амплитуду и фазу напряжения, зависящие от магнитного поля. В отличие от датчика постоянного сопротивления, здесь информативной величиной служит комплексный импеданс – он включает активную и реактивную составляющие. Его зависимость от поля обычно нелинейна; при этом наиболее крутые участки характеристики, определяющие полезную чувствительность преобразования, как представляется, располагаются лишь в ограниченном диапазоне внешних полей [1, 2].

Для прикладного контроля рабочую точку задают заранее – до начала измерений определяют область, где локальный коэффициент преобразования достаточно велик. Способы смещения определяются конструкцией сенсора и принятой схемой. Постоянное магнитное поле от катушки, магнит или электрический ток смещения могут использоваться для этой цели, если конструкция сенсора допускает такой режим, однако положение максимума производной и минимальный шум не обязаны совпадать [3, 4]. При большом градиенте внешнего поля активный чувствительный участок может намагничиваться неоднородно, что, в свою очередь, изменяет отклик.

Контроль арматуры не совпадает с лабораторным измерением однородного поля. На локальное распределение поля влияют геометрия железобетонного изделия, глубина залегания стержня, направление его оси, ферромагнитные включения и магнитная память материала. Сам по себе ГМИ-сенсор не измеряет глубину трещины непосредственно – он регистрирует магнитную аномалию, по которой геометрические характеристики дефекта можно оценивать лишь после калибровки и проверки модели. Если возбуждающее намагничивание отсутствует, поле от части повреждений может оказаться недостаточным; при активном намагничивании, напротив, появляется зависимость от конструкции магнитной системы.

Методы и методики

Предлагаемый лабораторный макет включает генератор высокочастотного тока, ГМИ-элемент, устройство задания магнитного смещения, предварительный усилитель, синхронный детектор, фильтр низких частот и аналого-цифровой преобразователь. Для регистрации эталонного изменения магнитного поля используют калибровочную катушку, параметры которой проверяют независимо. При обследовании конструкции к тому же необходим механический позиционер либо система учета координат сканирования.

Для малых отклонений поля в окрестности выбранной рабочей точки выходную величину можно представить линейной моделью. Она удобна для расчета чувствительности, но не предназначена для описания всего поля рабочего диапазона:

$$u_{\text{вых}}(t) = u_0 + S_u \cdot \Delta B(t) + n_u(t), \quad (1)$$

где S_u – локальная чувствительность по магнитной индукции;

u_0 – постоянная составляющая в выбранном режиме;

n_u – суммарный выходной шум.

Уравнение применимо в диапазоне, где нелинейный остаток не превосходит заранее заданного допуска. В измерительном тракте возможна также фазовая чувствительность $S_\varphi = d\varphi/dB$; амплитудный и фазовый каналы необходимо сравнивать по эквивалентному входному шуму, а не по абсолютной амплитуде в разных единицах.

$$S_u = \frac{\Delta u_{\text{вых}}}{\Delta B}, \quad S_\varphi = \frac{\Delta \varphi}{\Delta B}, \quad (2)$$

Структурно синхронное детектирование предусматривает умножение регистрируемого сигнала на согласованную опорную гармонику и последующее удаление высокочастотных членов. Двухквадратурная реализация снижает зависимость результата от неизвестной фазовой задержки, но требует контроля баланса каналов. После детектора регистрируемая оценка поля определяется калибровкой, а ошибка включает шум, дрейф смещения и нелинейность.

Чувствительность определяют по серии измерений при известных изменениях индукции либо напряженности поля, используя выбранную и явно указанную единицу измерения. При задании поля в теслах коэффициент пересчета выходного напряжения имеет размерность В/Тл; при переходе к А/м требуется корректная связь между В и Н для конкретной калибровочной геометрии. Нельзя смешивать эти определения без указания среды и условий.

Коэффициент линейной калибровки вычисляют по регрессии отклика на нескольких уровнях поля. Отклонения от линейности оценивают по остаткам, а не только по коэффициенту корреляции. Измерения желательно выполнять при возрастающем и убывающем поле, чтобы обнаружить гистерезис, а также после фиксированного времени прогрева электронного тракта.

Ключевой параметр – эквивалентная магнитная спектральная плотность шума. Ее рассчитывают делением спектральной плотности выходного напряжения на модуль коэффициента преобразования. Такой подход используется в работах по оптимизации шумовых характеристик ГМИ-сенсоров [3-5]. Значение шума зависит от частоты анализа: в низкочастотной области часто замечен фликкер-шум, поэтому нельзя характеризовать устройство единственным числом без указания частоты или полосы.

При сравнении двух фильтров одинаковое уменьшение среднеквадратического выходного шума не свидетельствует об одинаковом улучшении датчика: один из фильтров может одновременно подавлять полезный сигнал дефекта. Порог обнаружения целесообразно оценивать для фиксированного тестового магнитного возмущения, после приведения коэффициентов усиления, при одинаковом допустимом времени отклика.

$$b_n(f) = e_n \frac{f}{|S_u|}, \quad [b_n] = \frac{T_l}{\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}}, \quad (3)$$

При белом шуме в эффективной полосе Δf приближенная среднеквадратическая неопределенность равна $b_n \sqrt{\Delta f}$, однако при наличии частотно-зависимого шума требуется интегрирование измеренного спектра. Значения шума, полученные при различных полосах, допустимо сравнивать только после согласованного нормирования и с учетом частоты диагностического сигнала.

Результаты

Базовым методом принимается амплитудное детектирование с последующим цифровым фильтром низких частот. Второй вариант использует синхронное детектирование с опорой на генератор возбуждения и отдельной обработкой квадратурных компонент. Такой подход способен ослаблять широкополосные помехи вне полезной области частот, однако его эффективность зависит от фазовой стабильности, частоты дискретизации и схемы выделения

несущей. Возможности аппаратного синхронного детектирования для ГМИ-приложений рассмотрены в опубликованном исследовании [6].

Третья стратегия предусматривает оценивание медленно меняющегося базового уровня по эталонным участкам траектории с последующим его вычитанием. Она полезна при температурном и электронном дрейфе, но создает риск удаления протяженной пространственной аномалии, когда размеры предполагаемого дефекта сопоставимы с окном оценки фона. Поэтому величину окна следует задавать по физически обоснованному пространственному масштабу, а не произвольно оптимизировать по итоговой гладкости профиля.

Для подавления импульсных помех допускается применение медианной фильтрации. Для сглаживания при сохранении локальной формы используют полиномиальную аппроксимацию в скользящем окне данных. При выборе параметров фиксируют следующие величины: частоту отсчетов, размер окна, частоту среза, задержку, отношение сигнал/шум и сохранение амплитуды эталонного отклика – именно по ним сопоставляют режимы обработки. Параметры подбирают по обучающей серии проходов, затем проверяют на независимых проходах и при другой ориентации образца, а предварительную обработку и критерии исключения выбросов задают до просмотра контрольной части.

При пространственном сканировании особенно важна согласованность полосы фильтра. Ее соотносят со скоростью перемещения, поскольку именно она задает временной масштаб сигнала датчика. Если сенсор проходит характерный дефектный участок шириной L при скорости v , то время прохождения имеет порядок L/v – этот интервал определяет допустимую длительность сглаживания в используемом фильтре сканирования. Слишком узкополосная фильтрация, как известно, размывает максимум аномалии и смещает его относительно истинной координаты дефекта (табл. 1). По этой причине лабораторное сравнение желательно выполнять как при неподвижном образце, так и при нескольких скоростях сканирования – это позволяет сопоставить результаты неподвижного и динамического режима.

Таблица 1 – Основные методы обработки и ограничения

Метод	Преимущество	Риск
Огибающая и ФНЧ	Простая реализация	Фоновый дрейф и наводки
Синхронный детектор	Выделение сигнала у опорной частоты	Фазовая ошибка, задержка
Медианный фильтр	Подавление выбросов	Искажение узких пиков
Адаптивное вычитание фона	Снижение медленного дрейфа	Подавление протяженных аномалий

Алгоритм, обеспечивающий минимальный остаточный шум, не во всех случаях оказывается оптимальным для контроля. Необходимо проверить, сохраняются ли локализация и амплитуда магнитной аномалии на независимых проходах, поскольку именно эти параметры определяют пригодность обработки для последующей интерпретации. Отсюда следует практический вывод: при сравнении методов фильтрации оценивают не только шумовой остаток – дополнительно контролируют пространственное положение отклика и его амплитудное соответствие исходному сигналу.

Экспериментальная программа строится в два уровня. На первом уровне магнитное поле задают катушкой в диапазоне, который позволяет найти квазилинейный участок преобразования, определить шумовой спектр и оптимизировать электрические параметры. На втором уровне используют набор стальных образцов либо арматурных стержней – без искусственного повреждения и с заранее измеренными геометрическими неоднородностями; допустимо также применять контрольный образец с пазом или локальным уменьшением сечения, однако полученный результат не следует автоматически распространять на коррозионные и усталостные дефекты.

Для каждого образца фиксируют марку стали, геометрию, расстояние до датчика, ориентацию, способ намагничивания, температуру, скорость сканирования и характеристики крепления. После возврата позиционера в исходное положение проходы повторяют. Эталонный фон рекомендуется измерять на неповрежденном участке с аналогичной геометрией, но без проверки стабильности внешнего магнитного поля вычитать его не следует, поскольку изменение этого поля способно исказить результат. И во время сканирования необходимо исключать изменение расстояния до образца – иначе вариация зазора может имитировать дефект.

Количественное сопоставление проводят по независимым повторениям: используют ошибку восстановления уровня калибровочного поля, эквивалентный входной шум, амплитуду и ширину сигнала от контрольного дефекта, а также долю ложных тревог на неповрежденных образцах. Порог обнаружения фиксируют на обучающей группе, после чего применяют его в неизменном виде к контрольным сканам. Если доступно несколько одинаковых образцов, выборки следует разделять по объекту, а не по случайным соседним точкам одной кривой – такие отсчеты статистически зависимы, и по этой причине их нельзя рассматривать как независимые наблюдения.

Оценку целесообразно строить как многокритериальную задачу. Максимизация коэффициента преобразования без контроля линейности может привести к насыщению сигнала, тогда как уменьшение полосы пропускания снижает шум ценой потери пространственного разрешения. По нашему мнению, отсюда вытекает прямая зависимость настройки от цели измерения: оптимальный набор параметров выбирают с учетом конкретной диагностической операции - поиска локальной трещины, картирования положения арматуры или долговременного мониторинга слабых изменений поля.

Случайную составляющую ошибки определяют по повторным калибровкам и сканам. Систематические составляющие, в свою очередь, связывают с точностью эталонного поля, погрешностью измерения зазора, температурной нестабильностью и положением оси чувствительности. Результаты желательно представлять в виде доверительных интервалов или оценок расширенной неопределенности, сопровождая их протоколом условий, а при сравнении методов учитывать еще одно ограничение: если усреднение повторных проходов применяют только к одному из сопоставляемых методов, сравнение становится некорректным – из-за различного времени измерения.

Дополнительно необходимо различать чувствительность ГМИ-элемента как преобразователя магнитного поля и вероятность обнаружения заданного дефекта всей системой контроля. Улучшение первой величины не гарантирует улучшения второй: неоднозначность магнитного отклика объекта и изменения зазора способны преобладать над шумом электронной схемы. По этой причине валидация на макете должна обязательно дополнять измерения катушкой.

$$RMSE = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^n (\hat{B}_i - B_i)^2\right]}, \quad (4)$$

где B_i – эталонное поле;

$\hat{B}_i$ – оценка по каналу датчика.

Эта метрика характеризует калибровочную ошибку на наборе известных полей и не должна подменяться ошибкой локализации дефекта, имеющей пространственную размерность (табл. 2).

Таблица 2 – Критерии проверки качества измерительного канала

Критерий	Способ определения	Условие сопоставимости
S_u	Наклон калибровки	Одинаковая рабочая точка
b_n	Спектр шума / чувствительность	Одинаковая частота анализа
RMSE	Эталонная серия полей	Независимые контрольные уровни
Локализация	Отклонение координаты пика	Одинаковая скорость сканирования
Ложные тревоги	Неповрежденные образцы	Фиксированный порог

Для прикладной оптимизации целесообразно вводить ограничение по допустимому числу ложных тревог и по времени одного прохода. Только после выполнения этих требований сравнивают предельную чувствительность либо вероятность обнаружения эталонного повреждения.

Обсуждение

ГМИ-технология представляет интерес для компактных сканирующих устройств и распределенных измерительных каналов благодаря малому размеру чувствительного элемента и возможности регистрации слабых магнитных полей. В обзорах, посвященных современным ГМИ-системам, подчеркиваются преимущества интеграции аморфных микропроводов с электронной схемой и широкие перспективы миниатюризации [7, 8]. Однако такое развитие не отменяет ограничений диагностики массивных строительных объектов.

Для железобетона исследование целесообразно начинать с определения требуемой глубины контроля. Далее устанавливают допустимый зазор и оценивают влияние соседних арматурных стержней, поскольку их присутствие меняет локальную магнитную картину в зоне измерения. Для стальных балок, сварных соединений и канатов необходимо отдельно определить, какая доля сигнала связана с геометрией и остаточной намагниченностью – без такого разделения интерпретация результата теряет однозначность; контроль трещин посредством измерения поля, в свою очередь, требует эталонных дефектов и воспроизводимого режима намагничивания. Вывод о размере трещины, сделанный только по высоте одиночного магнитного пика, методически недостаточно обоснован.

При переносе лабораторной методики в полевые условия существенны экранирование от электросетевых наводок, регистрация фоновое поля, защита от вибрации, температурная компенсация и повторяемость позиционирования. Возможна и двухканальная схема измерения. Наличие двух каналов – измерительного и компенсационного – может позволить подавлять общие возмущения, однако такой результат требуется подтвердить экспериментально, а применимость магнитной диагностики к немагнитной арматуре и композиционным стержням образует отдельный вопрос. Прямое использование той же методики в данном случае не обосновано.

Заключение

Предложена обзорно-методическая схема оптимизации магнитного измерительного тракта на основе эффекта гигантского магнитного импеданса. Выбор параметров возбуждения и смещения необходимо выполнять совместно с настройкой усиления и обработки, поскольку эти блоки образуют единую измерительную цепь. Максимальная полевая чувствительность не во всех режимах дает минимальный эквивалентный магнитный шум – именно поэтому настройку следует проводить согласованно; при раздельном подборе параметров возможна потеря оптимума по суммарному качеству регистрации.

Показано, что сравнение алгоритмов детектирования требует единых условий калибровки. Необходимы одинаковая полоса или оговоренная задержка, независимые контрольные проходы и заданный эталонный магнитный сигнал. Практический критерий качества должен учитывать не только снижение уровня шума, но и сохранение пространственной формы полезной аномалии – иначе результат сопоставления будет отражать лишь степень сглаживания сигнала, а не пригодность алгоритма к диагностическому применению.

Предложенный план лабораторного исследования допускает выполнение на готовом ГМИ-сенсоре с калибровочной катушкой, простым позиционирующим устройством и металлическими образцами. До проведения таких испытаний приведенные положения следует рассматривать как обоснование методики, а не как подтверждение фактического улучшения характеристик конкретного прибора. Дальнейшее развитие работы связано с экспериментальным определением вероятности обнаружения стандартных дефектов – при различных зазорах, скоростях сканирования и уровнях помех; именно эта процедура должна дать количественную оценку диагностических возможностей подхода.

Литература

1. Panina L.V., Mohri K. Magneto-impedance effect in amorphous wires // *Applied Physics Letters*. 1994. Vol. 65, № 9. PP. 1189-1191.
2. Phan M.H., Peng H.X. Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002. Vol. 242-245. PP. 33-40.
3. Melo L.G.C. Optimization of the magnetic noise and sensitivity of giant magnetoimpedance sensors / L.G.C. Melo, D. Ménard, A. Yelon, L. Ding // *Journal of Applied Physics*. 2008. Vol. 103. Art. 033903.
4. Ménard D. Progress towards the optimization of the signal-to-noise ratio in giant magnetoimpedance sensors // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2006. Vol. 129, № 1-2. PP. 6-9.
5. Melo L.G.C. Formalism to Optimize Magnetic Noise in Giant Magnetoimpedance-Based Devices // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. Vol. 43, № 6. PP. 2992-2994.
6. Analog Lock-In Amplifier Design Using Subsampling for Accuracy Enhancement in GMI Sensor Applications // *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 1. Art. 57.
7. Recent Advances of Amorphous Wire CMOS IC Magneto-Impedance Sensors: Innovative High-Performance Micromagnetic Sensor Chip // *Journal of Sensors*. 2015. Art. 718069.
8. Application Topics of Amorphous Wire CMOS IC Magneto-Impedance Micromagnetic Sensors for I-o-T Smart Society // *Journal of Sensors*. 2019. Art. 8285240.