

# 3

## ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 004.93.11; 537.639; 550.8.053; 681.512; 681.512

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЩЕЛИ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТЕРМОСОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А.В. Петленко, А.Г. Коробейников, П.А. Сергушин

Рассмотрен метод определения метрических характеристик проводящих объектов для автоматизированных систем проведения электросварочных работ. Проведен анализ на предмет использования методов выделения геомагнитных аномалий для задач определения местоположения щели и контроля качества термосоединений непосредственно в процессе выполнения электросварочных работ.

**Ключевые слова:** магнитометрия, дефектоскопия, конформное отображение, электросварка.

#### Введение

Сенсорное восприятие промышленными роботами информации о рабочей среде позволяет реализовать их адаптивную подстройку и тем самым повысить эффективность выполнения ими технологических операций. Традиционным средством решения этих задач является использование систем технического зрения [1]. Однако, если трактовать понятие рабочей среды в широком смысле, то к этим системам можно отнести различные классы технических устройств – от радиолокационных станций и радиодальномеров до рентгеновских томографов и дефектоскопов. Различия в принципах и спектральном диапазоне их функционирования несущественны, если решается одна и та же задача – определение метрических характеристик объекта или их совокупности по регистрируемым особенностям рассеяния на нем (или на них) электромагнитного излучения.

Автоматизация таких металлоемких производств, как строительный монтаж или электросварка, может быть реализована с использованием современных технических средств и методов геофизики. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы продемонстрировать возможность определения метрических характеристик проводящих объектов по результатам измерения особенностей рассеяния на них электромагнитного излучения в диапазоне радиочастот и квазипостоянных полей, фиксируемых системой магниточувствительных датчиков. Показано также, что по ряду показателей информативность этой системы будет более высокой, чем у традиционно используемых систем оптического зрения.

#### Теоретические положения

Для поиска полезных ископаемых, различных ферромагнитных объектов, т.е. определения магнитных аномалий, разработаны достаточно хорошо зарекомендовавшие себя методы геофизики [2]. В связи с появлением новой элементной базы для магнитометрических комплексов, для которой характерно уменьшение массогабаритных характеристик, появилась возможность применения этих методов и в других приложениях, например, для решения задачи определения местоположения щели и контроля качества термосоединений непосредственно в процессе выполнения электросварочных работ.

Решение названной задачи основано на фундаментальной теореме Гаусса, отождествляющей глубину залегания точечного магнитного диполя, создающего анома-

лию, с ее полушириной. Селективная фильтрация вариаций поля позволяет детализировать структуру объекта. Поляризаационные отношения векторных компонент поля вариаций для разных спектральных составляющих позволяют определить углы залегания и простирания границ неоднородностей на разных глубинах. Значения этих углов выражаются посредством фазовых соотношений для соответствующих спектральных составляющих векторных компонент возмущений (аномалий) поля, вызванных одними и теми же неоднородностями.

### Задача определения метрических характеристик

Посмотрим, как влияют граничные условия на распределение особенностей электромагнитного поля вблизи границ неоднородностей. На рис. 1 представлены векторные компоненты изменений поля, вызванных перемещением стального уголка относительно магнитных датчиков.

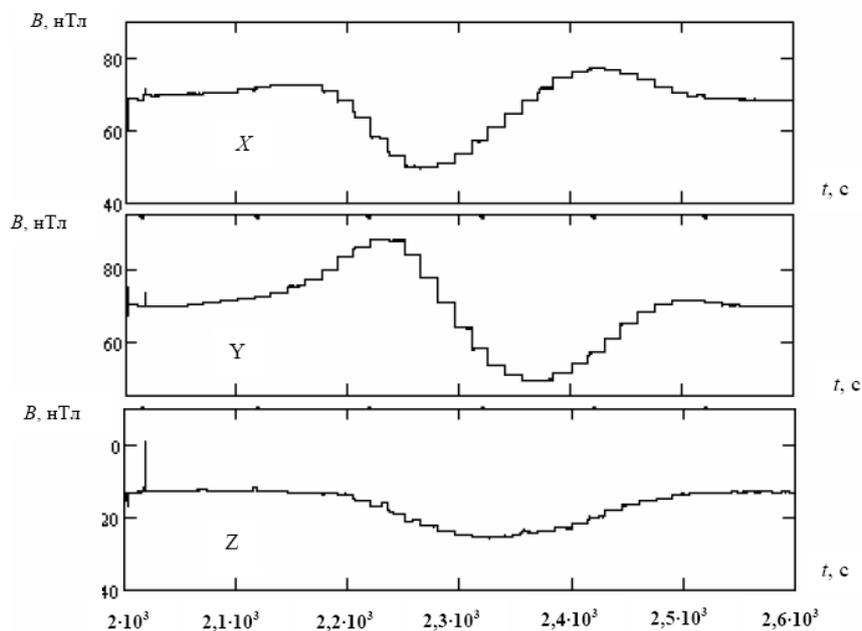


Рис. 1. Векторные компоненты поля

Хотя проведенные измерения позволяют с точностью в 1% определить длину и даже слабый (не больше  $1^\circ$ ) наклон оси уголка при его перемещении, метрические измерения нельзя считать удовлетворительными, если необходима установка объекта с допуском  $\pm 0,05$  см. Дело, во-первых, в том, что при указанной точности посадки детали модель ее намагниченности должна более точно учитывать ее конфигурацию. Во-вторых, магнитное поле убывает очень быстро – обратно пропорционально квадрату расстояния до источника. Поэтому измерения поля необходимо производить на небольшом (порядка 10 см) расстоянии от границ уголка. Однако здесь возникает очередная проблема. На рис. 1 хорошо заметно относительное запаздывание измеренных векторных компонент. Величина запаздывания в точности совпадает с расстоянием между компонентными датчиками, т.е. разные компоненты поля измеряются в разных точках. Но магнитное поле – это векторное поле. А над векторами, определенными в разных системах координат, нельзя производить операции сложения–вычитания. Это означает, в частности, что не удастся качественно разделить полезный сигнал и (аддитивную) шумовую составляющую, измеряя разные компоненты поля в точках, удаленных на одинаковое расстояние друг от друга и от границ исследуемого объекта.

Итак, в первую очередь необходимо найти более приемлемый способ измерения магнитных полей.

Представленные на рис. 1 поля измерялись торсионными датчиками, принцип действия которых основан на измерении токов компенсации, стабилизирующих положение магниточувствительного элемента, находящегося на оси вращения во внешнем измеряемом поле, и поле компенсирующей обмотки. Как видно из таблицы, в которой приводится краткая сводка различных способов детектирования магнитного поля, чувствительность этих датчиков очень высока (ее порог не превышает  $1 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$ ), но габариты велики (порядка 10 см), а частотный диапазон ограничен (примерно 10 Гц).

Однако из последней строки таблицы видно, что магнитопленочные (магниторезистивные) датчики меняют свое сопротивление при изменениях внешнего магнитного поля, и при включении в стандартную измерительную схему соответствующие изменения отображаются как флуктуации напряжения в широком диапазоне частот. Габариты этих датчиков очень малы, а чувствительность (с порогом  $1 \text{ нТл/Гц}^{1/2}$ ), хотя и не очень высока, но вполне достаточна, чтобы измерять вариации поля на расстоянии порядка  $10^2 \text{ см}$  с превышением 20 дБ над уровнем измерительных шумов. На расстоянии в 10 см от измеряемого объекта соответствующее превышение составит порядка 60 дБ.

Типы датчиков	Габариты $D$ , см	Чувствительность $S$ , пТл/Гц <sup>1/2</sup>	Частота $F$ , Гц	Прочие
Индукционные	0,1–100	1	$10^{-2} - 10^5$	$S$ определяется габаритами
Торсионные	10	1	не менее 10	$S$ критична к перемещениям
Квантовые и протонные	10	1–100	не менее 10	Необходимость накачки
Феррозондовые	0,1–1	10–100	не менее 10	Необходимость перемагничивания
Магнитопленочные (магниторезистивные)	0,1	1000	$10^{-3} - 10^8$	Низкая $S$

Таблица. Различные типы датчиков измерения магнитного поля

Простейшей системой, осуществляющей редукцию компонент поля, измеренного в разных точках, к точечным измерениям, является градиентная схема расположения магнитных датчиков. Отношение сигнал/помеха в этой системе при разносе компонентных датчиков примерно на 0,1 см и их удалении от границ исследуемого объекта на расстояние порядка 10 см, очевидно, останется не хуже 40 дБ, что позволяет проводить регистрацию особенностей поля, связанных с особенностями границ объекта.

При расчете поля вблизи границ проводящих объектов удобно воспользоваться методами пробного, или вынуждающего, воздействия, широко используемыми в геофизике при зондировании неоднородностей земной коры. Пробный сигнал излучается токовой петлей, или линией, радиофизическими аналогами которых являются индукционная рамка и вибратор Герца или обычная штыревая антенна. Рассеянный на неоднородностях сигнал детектируют, измеряя магнитные и (или) электрические поля. Ясно, что наличие хорошо проводящих структур приводит к увеличению доли отраженного сигнала в поле рассеяния. Варьируя положения излучателя и приемников, а также частоту зондирующего воздействия, оценивают и положение границ сред различной проводимости. Принципиальное различие определения этих границ и границ сред с разной намагниченностью – только в том, что последние сами являются источниками возмущений поля, не требуя дополнительного индуцирующего воздействия.

Если положить ток пробного источника установившимся (рис. 2, а), получим стационарную картину распределения поля в его окрестности. Посмотрим, как меняется эта картина в зависимости от изменения граничных условий, связанных только с изменением геометрии идеального проводника в поле линии постоянного тока. Строгое решение может быть получено как решение уравнения Лапласа [3] для идеально проводящего клина. Простое аналитическое решение получается, если токовая линия располагается вдоль ребра, образованного гранями клина, а угол между этими гранями  $\alpha$  кратен  $2\pi$ . Если  $\alpha = \pi$ , получим распределение поля для линии тока вблизи отражающего полупространства (рис. 2, б). Для прямоугольного клина ( $\alpha = \pi/2$ ) число особенностей поля, связанных с появлением зеркальных источников, возрастает (рис. 2, в), а распределение компонент поля меняется относительно аналогичного распределения поля такого же источника в свободном пространстве так, как это показано на рис. 2, г, д.

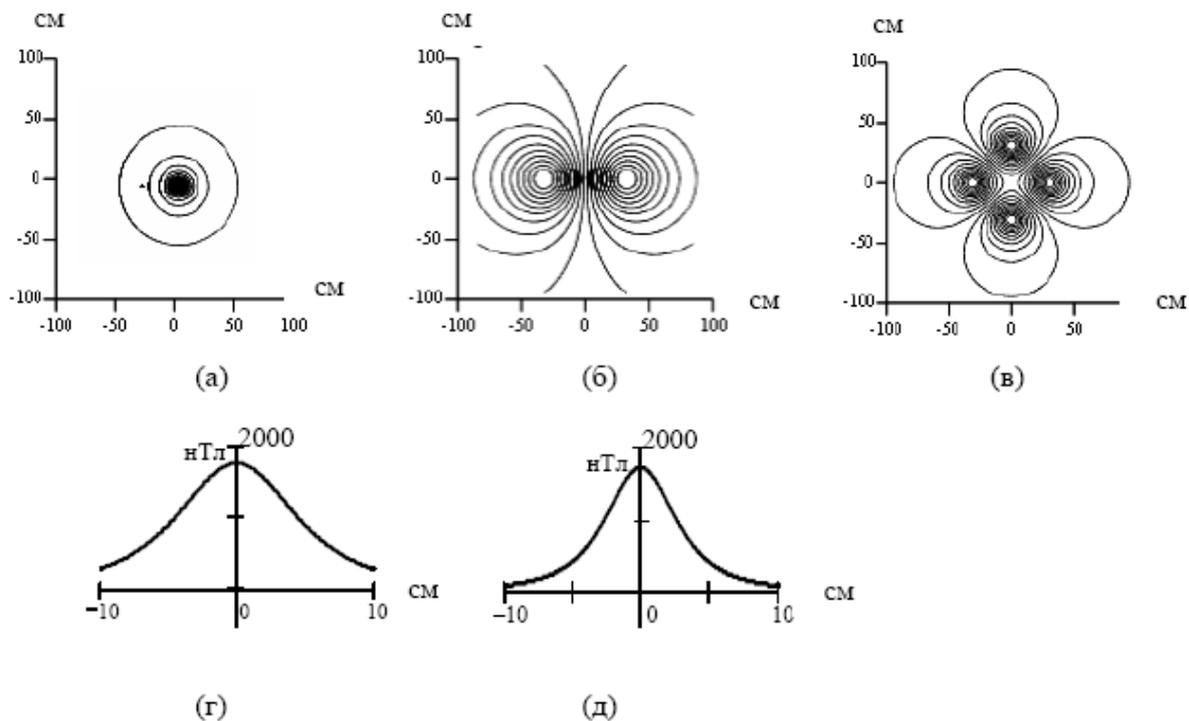


Рис. 2. Исследование магнитного поля пробного источника: а – ток пробного источника; б – распределение поля для линии тока вблизи отражающего полупространства; в – особенности поля, связанные с появлением зеркальных источников; г – распределение компонент поля при  $\alpha = 2\pi$ ; д – распределение компонент поля при  $\alpha = \pi$ .

Полученные решения позволяют перейти к рассмотрению более сложных и интересных с практической точки зрения граничных задач. Поскольку мы уже знаем, что магнитные измерения следует проводить вблизи границ проводящих объектов (на расстоянии порядка 10 см), то ограничимся классом  $2D$  задач, формулировка которых в виде уравнения Лапласа подразумевает возможность использования техники конформных отображений комплексной плоскости в рамках принципа соответствия границ [3].

Воспользуемся решением задачи о распределении поля вблизи отражающего полупространства, конформным отображением  $s = \coth(z/2)$  комплексной полуплоскости  $\{z\}$  на полосу  $[0, i\pi]$  плоскости  $\{s\}$ . Используя отображение  $w = 2h\pi^{-1}((e^s + 1)^{1/2} + \ln((e^s + 1)^{1/2} - 1) - s/2)$  внутренности этой полосы на внешность прямоугольного клина, приподнятого на высоту  $h$  над вещественной осью плоскости  $\{w\}$ , найдем распределе-

ние поля вблизи щелевого зазора шириной  $2h$  при различных положениях линии тока, ориентированной вдоль щели. Возможность пересчета поля для разных положений источника следует из принципа симметрии, характерного для конфигурации щели, и инвариантности поля токовой линии относительно ее смещения вдоль границы отражающего полупространства.

Выполним замену переменных, приняв  $t = e^{s/2}$ . При вещественных  $t$  замена  $u = \arcsin t$  приводит к соотношениям  $w = \cos u + \ln(\operatorname{th}(u/2))$ ,  $t = \sin u$ . Графически функциональная зависимость  $w(u)$  представляется в виде кривой преследования, особая точка которой (точка возврата) проецируется точно в центр щели. Эта кривая является дискриминантной для рассмотренной граничной задачи. Отображение  $s(z)$  характеризует поляризационные, а  $t(s)$  – фазовые соотношения для измеряемых компонент поля, т.е. особенности границ проводящих сред в поле рассеяния вынуждающего воздействия определяются так же, как и неоднородности намагниченности.

С практической точки зрения рассмотренная задача имеет очевидное ограничение. Предположим, что зазор образован парой прямоугольных клиньев. Тогда при нахождении положения зазора между пластинами конечной толщины такое предположение допустимо лишь для очень коротковолнового зондирующего воздействия. С другой стороны, длина волны такого воздействия должна быть соизмерима с шириной зазора – в противном случае размеры особенностей поля становятся исчезающе малыми, а сами они располагаются практически в пределах зазора, что затрудняет их наблюдение. Таким образом, необходимо решение более реалистичной задачи, учитывающей соизмеримость ширины зазора  $h$  и толщины  $H$  образующих его пластин. Такое решение было получено [4, 5] в терминах эллиптических функций, или в  $\theta$ -функциях Якоби (Римана). Анализ этого решения показывает, что длина волны зондирующего воздействия при нахождении отношения  $H/h$  в интервале [5, 10] может существенно (по крайней мере, на порядок) превышать  $H$ . Особенности поля, связанные с особенностями границ проводящих пластин, при этом регистрируются на расстоянии  $(2,5-3)H$  от щели. Более того, положение особенностей изменится, если пластины будут параллельны, но некомпланарны, а величина сброса будет соизмерима с шириной  $h$ .

### Задача дефектоскопии при сварочных работах

Определение величины сброса, или превышения кромки одной пластины над другой, методами иконки [1, 6] при использовании традиционных систем оптического зрения может стать серьезной проблемой, но просто решается системой, использующей измерения магнитных полей, рассеянных в окрестности отражающей границы. Это, наверно, не единственный случай, когда эффективность определения особенностей этих границ магнитоизмерительными системами оказывается выше, чем у традиционно используемых систем технического зрения. Здесь же хочется, хотя бы и очень кратко, остановиться на совершенно нетрадиционном аспекте их применения. Речь идет о возможности использования магнитоизмерительных систем для контроля качества термосоединений стальных конструкций непосредственно в процессе проведения электросварочных работ.

Хорошо известно [7], что с ростом температуры намагниченность ферромагнетиков падает, достигая исчезающе малой величины вблизи так называемой точки Кюри (порядка  $800^\circ\text{C}$ ). Температура шва в процессе сварки достигает примерно  $2000^\circ\text{C}$ . При скорости ведения сварочной головки в 30 см/мин на удалении 30 см от нее температура выше точки Кюри будет сохраняться в пределах 2 см от линии шва. Следовательно в пределах полосы шириной в 4 см намагниченность соединения будет иметь нулевое значение, а за пределами этой полосы будет нарастать по мере убывания температуры (рис. 3). Рас-

чет магнитного поля в зоне остывающего шва может быть получен на основе рассмотренной выше задачи. Используя результаты расчетов, можно контролировать величину допустимых отклонений поля, измеряемого в зоне провара. Эти отклонения будут характеризовать однородность провара, а, следовательно, и качество сварного соединения. Таким образом, на базе магнитоизмерительной системы возможна реализация устройств, позволяющих проводить оперативную дефектоскопию сварочных работ.

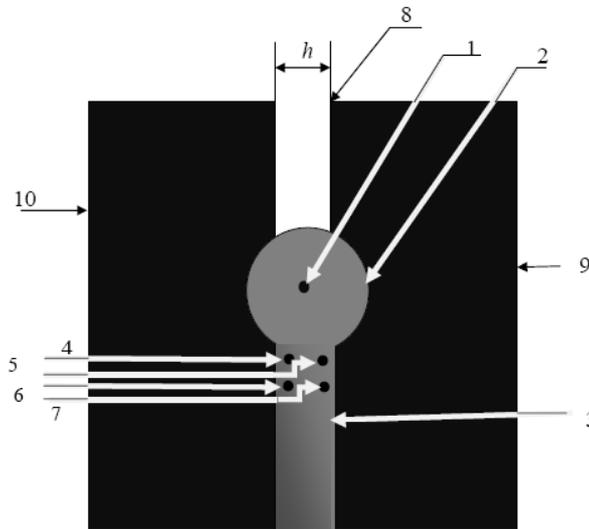


Рис. 3. Функциональная схема измерения магнитных полей в процессе электросварки:  
 1 – электросварочная головка, 2 – горячая зона с температурой 2000°C и радиусом 30 см, 3 – сварной шов, 4–7 – магнитометры, 8 – щель шириной  $h$ , 9, 10 – свариваемые металлические листы

### Заключение

Авторами получено решение задачи распределения магнитного поля от пробного источника заряда. Исследовано влияние на это решение различных граничных условий. Это позволяет решать в режиме реального времени задачу дефектоскопии.

Получено решение задачи нахождения зазора между пластинами конечной толщины. Это позволяет в процессе сварочных работ с требуемой точностью наводить сварочную головку на места стыка пластин.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности решения одной из основных задач, возлагаемых на системы технического зрения – определения метрических характеристик основных составляющих элементов металлоконструкции.

### Литература

1. Мошкин В.И., Петров А.А., Титов В.С., Якушенков Ю.Г. Техническое зрение роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
2. Уэйт Д.Р. Геоэлектромагнетизм. – М.: Недра, 1987. – 235 с.
3. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. – М.: Наука, 1987. – 688 с.
4. Ахиезер Н.И. Элементы теории эллиптических функций. – М.: Наука, 1970. – 284 с.
5. Пью А. Техническое зрение роботов. – М.: ИФС пабликешнз, 1987. – 319 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Т. 8. – М.: Наука, 1982. – 620 с.
7. Пименов Ю.В. Линейная макроскопическая электродинамика: Вводный курс для радиофизиков и инженеров. – М.: Издательский Дом «Интеллект», 2008. – 536 с.

- Петленко Александр Владимирович* – Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, научный сотрудник, Petlenko.58@mail.ru
- Коробейников Анатолий Григорьевич* – Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, доктор технических наук, профессор, зам. директора, Korobeynikov\_A\_G@mail.ru
- Сергушин Павел Анатольевич* – Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, младший научный сотрудник, Pavel.sergushin@gmail.com