

УДК 621.179.14; 621.317.44

МОДИФИКАЦИЯ МЕРЫ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ФЕРРОЗОНДОВЫХ ГРАДИЕНТОМЕТРОВ С НЕСООСНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОЛУЗОНДОВ

Кулагин В.Н., Осипов А.А., Пиунов В.Д.

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Для аппаратуры магнитной технической диагностики и неразрушающего контроля, как и для ряда средств измерений параметров магнитного поля, в качестве метрологического обеспечения часто используются меры параметров магнитного поля, содержащие катушки с электрическим током. Такие меры имеют некоторую рабочую область высокой однородности нужного магнитного параметра, требуемую для поверки или калибровки соответствующей аппаратуры.

Ранее была описана мера для калибровки используемых в структуроскопии феррозондовых градиентометров с несоосным (поперечным) расположением полузондов [1]. С целью создания области однородного градиента магнитного поля для таких градиентометров была предложена конструкция (рисунок 1), содержащая 2 пары градиентометрических катушек (колец) с током (градиентная пара [2] Максвелла).

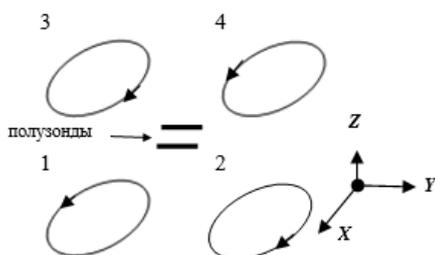


Рисунок 1 – Расположение токовых колец (катушек) для преобразователей с поперечным расположением полузондов

При этом пара колец 3 и 4 лежит в плоскости, расположенной на расстоянии $\Delta Z_{13} = \Delta Z_{24}$ от параллельной ей плоскости, в которой лежит другая пара колец 1 и 2 (рисунок 1). Эта мера, в сравнении с серийно выпускаемой [3] мерой градиента напряженности постоянного магнитного поля М-101, обладающей «односторонним» (по одной координате) доступом в рабочую область (куб с размерами сторон 10 мм при относительной неоднородности градиента в ней 1,5 %), имеет «трёхсторонний» доступ в свою рабочую область. При этом неоднородность градиента по всем трём взаимноперпендикулярным осям менее 0,5 % в объёме куба с размерами сторон 40 мм. Но, даже «трёхсторонний» доступ в рабочую область меры, если она находится внутри системы токовых катушек, ограничивает её использование, если малогабаритный градиентометр оказывается встроенным в систему преобразователя, содержащего, например, намагничи-

вающие катушки, превосходящие размер рабочей области меры. Такие преобразователи с наличием градиентометров, выполненных из двух полузондов (рисунок 1), используются в дефектоскопии при измерении магнитной анизотропии ферромагнитных изделий [4, 5] и в ряде других случаев. Для их калибровки и поверки не подходят вышеуказанные меры [1, 3].

Ниже описана модифицированная мера градиента магнитного поля с областью однородности градиента магнитного поля, находящейся снаружи системы токовых катушек, не имеющая ограничений при расположении преобразователя в плоскости перпендикулярной осям этих токовых катушек на некотором расстоянии от них.

Для создания реально работающей конструкции такой меры на основе закона Био-Савара-Лапласа был проведен расчёт градиента магнитного поля G системы токовых колец, показанных на рисунке 1 с одной парой колец (1 и 2) без наличия колец 3 и 4. Определялась такая их конфигурация, чтобы составляющая градиента напряжённости магнитного поля dH_x/dz или dH_y/dz в области указанного на рисунке 1 расположения полузондов градиентометра преобразователя имела бы минимальную неоднородность.

Предполагалось, что оси X и Y расположены в горизонтальной плоскости, ось Z направлена по высоте меры. Форма катушек использовалась прямоугольная, толщина намотки по всем размерам была выбрана одинаковой и равной 10 мм, то есть рассмотрен вариант относительно тонких катушек. Рассматривалась возможность создания однородного градиента по координатам в зоне 30–40 мм, необходимой при длине полузондов ($L_1 = L_2 = 15$ мм) и поперечного расстояния (ΔZ) между ними в 15 мм.

При проведении численного расчета по каждой из трех проекций магнитной индукции в качестве исходных использовались выражения вида (в СИ)

$$dB_x = \mu_0 I \cdot (dl_y r_z - dl_z r_y) / (4\pi r^3), \quad (1)$$

$$dB_y = \mu_0 I \cdot (dl_z r_x - dl_x r_z) / (4\pi r^3), \quad (2)$$

$$dB_z = \mu_0 I \cdot (dl_x r_y - dl_y r_x) / (4\pi r^3), \quad (3)$$

где I – величина тока в проводнике, dl – элемент проводника, r – радиус-вектор, проведенный от элемента проводника в рассматриваемую точку поля.

Оказалось, что и для двух таких катушек (колец) возможно нахождение лежащей на некото-

ром расстоянии от катушек по оси Z области с однородностью, достаточной для требуемой точности метрологического обеспечения калибровочных и поверочных работ. На рисунке 2 показаны характеристики градиента напряжённости магнитного поля рабочей области одного из численно рассчитанных и реализованных вариантов модифицированной меры.

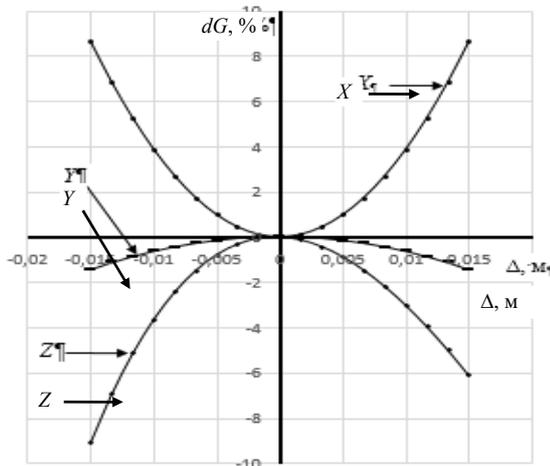


Рисунок 2 – Изменение величины градиента магнитного поля при смещении точки измерения Δ от центра рабочего объема меры по координатам X , Y и Z

Из рисунка 2 видно, что по координате Y на расстоянии ± 5 мм неоднородность градиента не превышает долей процента, а по координатам X и Z – около 1%. В рассмотренном конкретном случае получены сравнительно неплохие показатели однородности, не хуже, чем для серийной меры М-101.

Для практического использования важно, чтобы, по крайней мере, по одной из координат изменение (неоднородность) величины градиента магнитного поля в рабочей области меры была минимальной, но это справедливо при соосном расположении полузондов. Учитывая довольно большое расстояние (от нескольких миллиметров до десяти и более) между полузондами (рисунок 1), важно, чтобы хотя бы по двум координатам (например, Y и X) неоднородность вдоль них также была достаточно мала.

Обычно, требования к неоднородности по третьей координате заметно ниже и зависят от диаметра используемых полузондов. Следует также обратить внимание, что неоднородности по координатам Z и X хотя и близки, но имеют различия, которые следует учитывать. Так неоднородность по координате X симметрична, как и величина создаваемого мерой магнитного поля, относительно центра системы координат (рисунки 1 и 2).

Неоднородность магнитного поля по абсолютной величине по координате Z заметно больше слева, чем справа. Это связано с тем, что поле по координате X создается симметрично расположенными по X градиентными катушками 1 и 2 (рисунок 1). То же самое можно сказать и в отношении координаты Y .

В направлении же координаты Z , поскольку верхние катушки 3 и 4, приведенные на рисунке 1, не используются в данном случае, то и неоднородность несимметрична относительно центра координат.

Вычисления были проведены для нескольких вариантов размеров разрабатываемой меры. Вариант, представленный на рисунке 2, обеспечивает создание меры с максимальными внешними размерами, не превышающими 200 мм.

Подобная модифицированная мера может быть полезна для метрологического обеспечения аппаратуры, которая используется в магнитной технической диагностике и неразрушающем контроле, где малогабаритный градиентометр является составным элементом крупногабаритного преобразователя, например, в магнитной структуроскопии при использовании приборов импульсно-локального типа.

Применённая модель и расчётный механизм громоздки и не позволяют получить однозначного аналитического решения, но, с использованием современной вычислительной техники, дают возможность находить приемлемые варианты как градиентометрических, так и полевых мер для конкретных конструкций преобразователей, особенно для крупноразмерных.

Литература

1. Кулагин, В.Н. Мера для калибровки феррозондовых градиентометров с несоосным (поперечным) расположением полузондов / В.Н. Кулагин, А.А. Осипов, В.Д. Пиунов // Доклады 12-й международной научно-технической конференции «Приборостроение 2019», – Минск: БНТУ – С. 148–150.
2. Афанасьев, Ю.В. Средства измерений параметров магнитного поля. / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
3. Мера градиента напряжённости постоянного магнитного поля М-101. Государственный реестр средств измерений Российской Федерации, 2010, № 44867–10.
4. Счастный, А.С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20–33.
5. Счастный, А.С. Механическая анизотропия и параметры петли магнитного гистерезиса листового проката низкоуглеродистых сталей / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2015. – № 3. – С. 15–27.