

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ИЗМЕРЕНИЕ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ. ЧАСТЬ 2. СХЕМЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Обговорюється можлива технологія вимірювань зовнішнього магнітного поля електроустаткування за схемами надпровідних точкових датчиків і контурних обмоток.

Обсуждается возможная технология измерений внешнего магнитного поля электрооборудования по схемам сверхпроводящих точечных датчиков и контурных обмоток.

Прежде всего, рассмотрим вопрос о том, какая часть измеряемого магнитного потока проникает в сверхпроводящий сердечник элемента Мейснера, используемого в качестве точечных датчиков измерительной системы из четырех датчиков, рис. 1, если он выполнен из сверхпроводника второго рода.

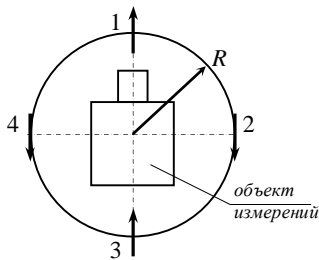


Рис. 1

Сверхпроводники второго рода имеют два критических поля $H_{к1}$ и $H_{к2}$ и в этом диапазоне сверхпроводник находится в "смешанном" состоянии, когда магнитное поле проникает в сверхпроводник отдельными квантами потока $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-7} \text{ Гс} \cdot \text{см}^2 = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$ [1]. Поскольку с увеличением глубины проникновения поля (например при $T \rightarrow T_c$) величина $H_{к2}$ растет, а $H_{к1}$ уменьшается [2], то вполне вероятно, что измеряемое внешнее магнитное поле электрооборудования окажется в диапазоне $H_{к1} \leq H \leq H_{к2}$. Автор вихревой решетки проникающих в сверхпроводник второго рода квантов Φ_0 Абрикосов А.А. в работе [2] приводит размеры таких вихрей: находящаяся в нормальном состоянии "сердцевина" размером ϵ (длина когерентности или размер куперовской пары) с магнитным потоком Φ_0 и внешняя область размером λ (глубина проникновения) со сверхпроводящим током вихря. При увеличении магнитного поля плотность вихрей возрастает, а расстояние между ними сокращается и при величине поля $H_{к2}$ вихри соприкасаются своими нормальными сердцевинами и происходит фазовый переход второго рода – сверхпроводник переходит в нормальное состояние [1]. Период квадратной вихревой решетки ℓ_0 можно определить из формулы $B\ell_0^2 = \Phi_0(H\ell_0^2 = \Phi_0)$ [2]. Если измеряемое поле находится в пределах $(0,1 \div 1) \text{ Э}$, то $\ell_0 = (1,44 \cdot 10^{-3} \div 4,55 \cdot 10^{-4}) \text{ см}$. Определим какой процент измеряемого магнитного потока в элементе Мейснера составит поле вихревой решетки при магнитном поле $H = 1 \text{ Э} = 10^3 / 4\pi \text{ А/м}$. Например прямоугольный сердечник размером сечения $a \times b = (2 \times 2) \text{ см}^2$ будет содержать $n = m^2$ вихрей с потоком Φ_0 , где $m = a/\ell_0 = b/\ell_0 = 2/10^{-4} \cdot 4,55 = 0,44 \cdot 10^4$. Тогда суммарный магнитный поток n вихрей будет равен $\Phi_0 n = 2,07 \cdot 10^{-15} \cdot 0,44^2 \cdot 10^8 = 0,4 \cdot 10^{-7} \text{ Вб}$, а весь измеряемый магнитный поток $\Phi = \mu_0 \cdot H \cdot a \cdot b = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^3 / 4\pi \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0,4 \cdot 10^{-7} \text{ Вб}$. Таким образом, в смешанном

состоянии через сверхпроводник второго рода проходит весь измеряемый поток (в виде n вихрей, несущих кванта магнитного потока Φ_0 каждый). Из этого обстоятельства следует, что использование сверхпроводников второго рода в качестве сердечника элементов Мейснера в измерительной системе четырех точечных датчиков целесообразно в том случае, когда измеряемое поле меньше первого критического поля материала сверхпроводника $H_{к1}$ (а значит реализуется эффект Мейснера при уменьшении температуры до $T < T_c$ – выталкивание магнитного поля из тела сердечника).

Более предпочтительными являются контурные измерительные системы, которые исключают из измерений три следующие за диполем пространственные гармоники [3], что позволяет приблизить ИС к объекту и тем самым улучшить соотношение сигнал-помеха.

На рис. 2 представлены две кольцевые обмотки, которые при включении на диполь ($n = 1$) и соотношении размеров $\ell = r$, исключают из измеряемого поля три, следующих за диполем мультиполя (квадруполь $n = 2$, октуполь $n = 3$ и $n = 4$). Создаваемый охватываемым такой ИС объектом магнитный поток может быть измерен при переводе колец в нормальное состояние в собранном виде или по отдельности. В зависимости от формы и габаритов измеряемого объекта наряду с кольцевыми контурными ИС могут использоваться седлообразные или квадратные ИС [3].

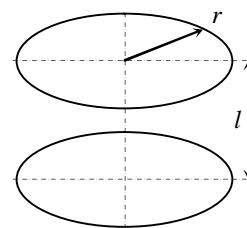


Рис. 2

1. Возможная технология измерений

1.1. Измерения поля остаточной и индуцированной намагниченности

а) Измерение с помощью помехозащищенной системы четырех точечных датчиков Мейснера (рис. 1), которая позволяет исключить из измерений поле Земли и промышленных помех. Стрелками на рисунке обозначено направление магнитной оси датчиков. После установки технического объекта в центре измерительной системы перевести датчики в режим сверхпроводимости (магнитное поле выталкивается из датчиков) и одновременно измерить ЭДС. Затем перевести датчики в нормальное состояние (магнитный поток проходит через датчики) и измерить ЭДС.

© Боев В.М.

Затем повернуть объект на 180° и повторить измерение. Сумма показаний при двух положениях объекта (различие 180°) дает индуцированную намагниченность, разность – остаточную. Следует отдельно определить индуцированную и остаточную намагниченности при переходе датчиков из нормального состояния в сверхпроводящее и отдельно при обратном переходе, затем взять полусумму. Вышеописанная схема измерений может составить конкуренцию измерениям остаточных и индуцированных полей магнитометром с четырьмя датчиками.

Примечания. Основными препятствиями к реализации вышеописанной измерительной системы будут:

1. Необходимости выполнения многовитковых обмоток для датчиков.

2. Возможная неодновременность сверхпроводящего перехода в различных датчиках системы.

Оба фактора могут существенно повлиять на погрешность измерений. Однако, во втором случае возможны измерения для каждого из датчиков в отдельности с последующим расчетом в соответствии со схемой соединения датчиков.

б) Измерение с помощью двух включенных на диполь (размещенных для измерения диполя) контурных сверхпроводящих колец (используется эффект Оннеса). Расстояние между кольцами равно радиусу колец.

Перевести кольца в сверхпроводящее состояние и удалить измеряемый объект. Измерить захваченный кольцами магнитный поток (например, измерив ток в кольцах). Переводом колец из сверхпроводящего состояния в нормальное, также можно измерить захваченный поток каждого из колец (ЭДС от исчезающего потока). Результаты измерений для каждого из колец складываются, т.к. включение – на диполь. Затем установить измеряемый объект в противоположном направлении (с поворотом на 180° относительно предыдущего положения) и повторить измерения. Сумма данных измерений прямого и обратного положения дает удвоенное значение индуцированного поля объекта. Поле земли (и постоянные во времени помехи) не наводит ЭДС, так как остается сцепленным с кольцами и после перевода их в нормальное состояние. Разность данных измерений прямого и обратного положения даст удвоенное значение поля остаточного намагничивания.

Примечание. При этом следует иметь в виду, что магнитный поток, захваченный кольцами, может измеряться отдельно в каждом кольце, в том числе, перенесенном в другое место (захваченный поток сохраняется). При условии точного измерения потоков колец, точность измерений в целом будет высокой.

1.2. Измерение внешнего магнитного поля электрооборудования от постоянных токов.

а) Измерение с помощью помехозащитной системы четырех датчиков Мейснера.

Включить измеряемое оборудование, установленное в центре измерительной системы, перевести датчики в сверхпроводящее состояние и измерить возникающую при этом ЭДС. Затем перевести датчики в нормальное состояние и измерить ЭДС. Результат определяется как полусумма значений поля, вычисленных по ЭДС вхождения датчиков в сверхпроводящее состояние и выхода из него.

б) Измерение с помощью двух сверхпроводящих контурных колец (размещенных в соответствии с раз-

мерами измерительных контурных обмоток предназначенных для измерения дипольных магнитных моментов). После установки измеряемого электрооборудования в центре системы двух контурных колец установить требуемый режим работы электрооборудования. Затем перевести контурные кольца в сверхпроводящее состояние и выключить электрооборудование. Измерить захваченный каждым из колец магнитный поток (например, измерив величину сверхпроводящего тока или путем перевода колец в нормальное состояние и измерения ЭДС от исчезающего магнитного потока). Результаты измерений по каждому из колец складываются (измеряется дипольное поле). При этом магнитное поле Земли, поле остаточной и индукционной намагниченности и поле постоянных во времени промышленных помех не входят в измеряемый захваченный поток, т.к. все время остаются сцепленными с кольцами.

Примечание. В случае использования для определения потока закона Фарадея, предварительно должна быть исследована взаимосвязь ЭДС (несинусоидального, аperiodического характера) с захваченным магнитным потоком (при переводе колец в нормальное состояние). Если захваченный поток измерить точно, то и точность измерений в целом будет высокой.

Таким образом, основным преимуществом сверхпроводящих измерительных систем является возможность исключения из измерений поля промышленных помех и магнитного поля Земли, что может существенно повысить точность измерений. К недостаткам следует отнести общеизвестные неудобства, связанные с низкотемпературными установками (даже если они работают при температуре жидкого азота 77°K).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. – М.: Наука, 1982. – 240 с.
2. Абрикосов А.А. Сверхпроводники второго рода и вихревая решетка. – УФН. – 2004. – № 11. – С. 1234-1239.
3. Боев В.М. Экспериментальное определение распределения полей рассеяния электрооборудования в окружающем пространстве. – ИВУЗ, Энергетика. – 1981. – № 6. – С. 32-37.

Bibliography (transliterated): 1. Shmidt V.V. Vvedenie v fiziku sverhprovodnikov. - M.: Nauka, 1982. - 240 s. 2. Abrikosov A.A. Sverhprovodniki vtorogo roda i vikhrevaya reshetka. - UFN. - 2004. - № 11. - S. 1234-1239. 3. Boev V.M. 'Eksperimental'noe opredelenie raspredeleniya polej rasseyaniya 'elektrooborudovaniya v okruzhayushchem prostranstve. - IVUZ, 'Energetika. - 1981. - № 6. - S. 32-37.

Поступила 29.05.2012

Боев Вячеслав Михайлович, д.т.н., проф.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
Кафедра "Теоретические основы электротехники"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел/факс (057) 7076961

Boev V.M.
Superconductivity and measurement of external magnetic fields of electrical equipment. Part 2. Circuits and measuring technology.

A feasible measuring technology for external magnetic field of electrical equipment with application of circuits of superconducting point sensors and loop windings is discussed.

Key words – magnetic field, superconductivity, measuring technology.