

А.Е. МАШНЕВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

С.В. ПЕТРОВ, гл. инженер, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков

И.С. ВАРШАМОВА, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Приведено результати експериментальної перевірки компенсаційного методу при вимірюваннях параметрів постійного магнітного поля технічних об'єктів в умовах спеціалізованого стенду.

Приведены результаты экспериментальной проверки компенсационного метода при измерениях параметров постоянного магнитного поля технических объектов в условиях специализированного стенда.

Введение. Измерения постоянных магнитных полей (МП) низкого уровня является актуальной при создании технических объектов (ТО), особенно для космических аппаратов (КА) с магнитными системами, используемыми в управлении движением КА на орбите [1]. Эти вопросы представляют интерес и при обеспечении электромагнитной совместимости электрооборудования с плотной компоновкой как силовых, так и слаботочных цепей управления, защиты и контроля [2]. При выполнении измерений малых уровней магнитного поля ТО (10-100 нТл) на точность измерений оказывает большое влияние магнитные помехи даже слабой интенсивности. В этой связи при организации измерений используется компенсационный метод, основанный на введении в измеряемый сигнал дополнительной составляющей от поля помехи с противоположным знаком. Этот метод реализован на специализированном стенде магнитных измерений Национального технического центра магнетизма технических объектов НАН Украины (Стенде) (г. Харьков) [3] и обеспечивает высокую точность измерений в условиях стационарной помехи. Стенд представляет собой электро-техническую установку, укомплектованную средствами измерений, источниками питания и нагрузки испытуемого ТО и технологическими устройствами для создания однородного МП в рабочем объеме. Уровень стационарных магнитных помех в рабочем объеме Стенда, создаваемых при отсутствии ТО, сведен до минимума и при оценке погрешности может быть принят равным нулю. На Стенде это требова-

ние обеспечивается с помощью колец Гельмгольца – системы токовых обмоток, оси которых ориентированы в трех ортогональных пространственных направлениях. При питании обмоток постоянными токами от высокоточного стабилизированного источника они создают однородное МП заданного уровня.

Однако в реальных условиях на точность измерений оказывает влияние нестационарная помеха, связанная с воздействием МП от источников поля, находящихся на значительном удалении от него (100 м и более), а также низкочастотными (до 0,2 Гц) пульсациями геомагнитного поля [4].

Цель работы – экспериментальная проверка компенсационного метода измерений на Стенде в условиях помех от внешних источников.

Компенсационный метод измерений. Магнитные измерения ТО выполнены на Стенде феррозондовыми магнитометрами с двумя однокомпонентными феррозондовыми датчиками (ФД), измерительным и компенсационным [5]. Оба ФД конструктивно выполнены однотипными, в виде цилиндрического магнитного сердечника, на котором расположены измерительная и намагничивающая обмотки. Сердечник является концентратором магнитного потока, пропорционального напряженности МП, и выполняет функцию нелинейного преобразования входного сигнала напряженности в ЭДС измерительной обмотки.

Принцип работы ФД основан на нелинейном преобразовании переменного модулирующего МП при воздействии измеряемого постоянного МП. Модулированный сигнал имеет частоту существенно отличающуюся от частоты сети Гц, чем обеспечивается снижение помех от источников поля промышленной сети при измерениях. Каждый из ФД характеризуется "магнитной осью" или осью чувствительности, в направлении которой проводится измерение выбранной компоненты напряженности МП. В общем случае магнитный материал сердечника характеризуется неоднородной намагниченностью в различных пространственных направлениях. Поэтому при математическом описании используется представление магнитной проницаемости как тензора, компоненты которого пропорциональны компонентам напряженности МП [6]. Постоянное МП, действующее на ФД, представлено двумя основными составляющими, создаваемыми МП ТО и магнитным полем Земли. Основная задача измерений заключается в выделении сигналов, пропорциональных компонентам напряженности измеряемого МП на фоне помех от внешних источников МП, расположенных за пределами Стенда, включая и низкочастотные вариации магнитного поля Земли.

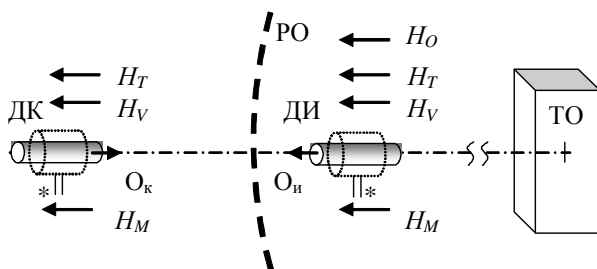


Рис. 1

Реализация этого метода осуществляется путем введения в цепь измерительного датчика второго датчика – компенсационного, электрическое соединение которого выполняется встречно измерительному датчику. Компенсационный датчик удаляется на значительное расстояние от ТО, чем обеспечивается исключение влияния МП ТО на этот датчик, и его сигнал принято считать пропорциональным полю помехи.

На рис. 1 показана схема расположения ТО и ФД при измерениях на Стенде, а также составляющие полей, формирующие сигнал в измерительной системе. Обозначения на рис. 1: ТО – технический объект; РО – граница рабочего объема; ДИ и ДК – измерительный и компенсационный ФД; H_O , H_T , H_V , H_M – напряженность МП ТО, Земли, помех от внешних источников и вариаций поля Земли, модулирующего поля; $O_{И}$, O_K – "магнитные оси" измерительного и компенсационного ФД; * – маркированный вывод ФД, используемый для встречного включения датчиков в схему измерений.

Процесс измерения выполняется по следующему алгоритму:

- создание в рабочем объеме МП нулевого уровня (компенсация магнитного поля Земли и стационарных помех);
- установка измерительного ФД в рабочем объеме, а компенсационного ФД – на определенном удалении от ТО, при котором уровень его МП не превышает заданного;
- подбор нулевого показания прибора путем перемещения и поворота компенсационного ФД;
- размещение ТО в рабочем объеме;
- измерение компонент напряженности суммарного МП ТО и помех на фиксированной частоте (на частота второй гармоники переменной ЭДС);
- удаление ТО из рабочего объема стенда на расстояние, при котором сигнал в измерительной системе от его МП не превышает по-

грешности измерений (в соответствии с методикой измерений [7] не менее пяти габаритных размеров ТО);

– проверка условия компенсации МП в рабочем объеме (проверка стационарности помехи).

Математические соотношения. Сигнал переменной ЭДС $e(t)$, снимаемой с измерительной обмотки ФД, можно получить на основе закона электромагнитной индукции, используя следующую цепочку преобразований:

$$e(t) = -\frac{d\Psi(t)}{dt} = -w\frac{d\Phi(t)}{dt} = -wS\frac{dB(t)}{dt} = -wS\mu_0\frac{d(\mu_d^* \cdot H(t))}{dt}, \quad (1)$$

где $\Psi(t)$ – полное потокоцепление измерительной обмотки ФД; w – число витков обмотки; $\Phi(t)$ – магнитный поток, проходящий через обмотку; S – площадь сердечников феррозонда; $B(t)$ – индукция МП; μ_0 – магнитная постоянная; μ_d^* – относительная динамическая проницаемость сердечника; $H(t)$ – составляющая вектора напряженности МП в направлении оси ФД.

Напряженности полей, действующих на измерительный – $H_n(t)$ и компенсационный – $H_k(t)$ ФД могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_n(t) &= \mathbf{H}_O + \mathbf{H}_T + \mathbf{H}_M(t) + \mathbf{H}_V(t); \\ \mathbf{H}_k(t) &= \mathbf{H}_T + \mathbf{H}_M(t) + \mathbf{H}_V(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $H_n(t)$, $H_k(t)$ – напряженности МП в месте расположения соответственно измерительного и компенсационного ФД; H_O – напряженность измеряемого постоянного МП ТО; H_T – напряженность МП Земли; $H_M(t)$ – напряженность модулирующего МП; $H_V(t)$ – напряженность поля помех и вариаций МП Земли.

Соотношение для ЭДС измерительной обмотки каждого ФД, полученное из (1) с учетом (2) и тензорного характера зависимости магнитной проницаемости сердечника от напряженности МП, может быть записано в виде, аналогичном приведенному в работе [5]:

$$e(t) = -wS\mu_0 \left\{ \mu_d^*[\mathbf{H}(t)] \mathbf{j} \frac{d\mathbf{H}_j(t)}{dt} + H_j(t) \frac{d\mu_d^*[\mathbf{H}(t)]}{dt} \mathbf{j} \right\}, \quad (3)$$

где $\mu_d^*[\mathbf{H}(t)]$ – тензор относительной динамической проницаемости сердечника; \mathbf{j} – единичный вектор "магнитной оси" ФД; $H_j(t)$ – компонента вектора $\mathbf{H}(t)$ напряженности МП в направлении "магнитной оси" ФД.

Суммарная ЭДС измерительной системы формируется путем вы-

читания ЭДС измерительного и компенсационного ФД. При этом составляющие от МПЗ и модулирующего поля полностью компенсируют друг друга. С учетом этого суммарная ЭДС определяется составляющими напряженности МП ТО и поля нестационарных помех, включая и вариации МП Земли. Оценка максимальной величины амплитуды ЭДС может быть получена исходя из условия, что амплитуды этих составляющих МП складываются.

При измерениях на частоте, равной двойной частоте модулирующего МП, из соотношения (3) по аналогии с [5] можно получить выражение для амплитуды E_{m2} ЭДС второй гармоники:

$$E_{m2} = G_2 \mu_0 H_{j2} + E'_{m2}, \quad (4)$$

где G_2 – коэффициент преобразования ФД; H_{j2} – амплитуда напряженности измеряемого МП; E'_{m2} – амплитуда второй гармоники ЭДС, наводимой в ФД полями помехи и вариациями МП Земли.

Как видно из формулы (4), при высокоточных измерениях величина E'_{m2} определяет погрешность измерений на второй гармонике МП ТО.

Экспериментальные исследования. Для оценки погрешности, вносимой нестационарными помехами и вариациями МП Земли в результат измерений с помощью системы ФД постоянного МП ТО, проведены экспериментальные исследования на Стенде. Измерения напряженности (индукции) поля помехи и МП Земли проводились на Стенде в различные промежутки времени в течение суток. Результаты измерений постоянного МП с помощью системы ФД выводились на самописец. Типичный вид одного из графиков с максимальным разбросом уровня помехи приведен на рис. 2.

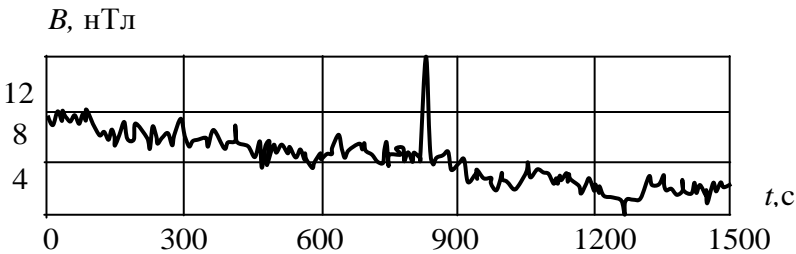


Рис. 2

Как видно на графике рис. 2, нестационарная помеха в рабочей области Стенда содержит кратковременные импульсы и медленно меняющуюся составляющую. Эти пульсации МП заметны даже в течение относительно небольших (5 мин) интервалов измерений. Максимальный диапазон вариаций МП Земли для стенда составляет 12 нТл. В этой связи операция проверки компенсации помехи при отсутствии ТО в рабочем объеме Стенда является обязательной. В случае, когда отклонение уровня помехи превышает заданную величину, необходимо повторять измерения. Такие повторения могут быть многократными, что ведет к увеличению стоимости проведения измерений. Помимо этого для силового ЭО существенно возрастает потребление электроэнергии.

Для повышения точности рекомендуется сокращать время замеров поля при включенном ТО. В случае измерений МП сильноточного ЭО в перспективе необходима разработка методов и способов автоматического слежения и компенсации нестационарной помехи и вариаций МП Земли на Стенде.

Вывод. При проведении высокоточных измерений постоянного магнитного поля технических объектов необходимо учитывать наличие нестационарных помех и вариаций магнитного поля Земли. В перспективе необходима разработка способов автоматической компенсации полей нестационарных помех.

Список литературы: 1. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с. 2. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. – М.: Радио и связь, 1989. – 223 с. 3. Розов В., Ерисов А., Волохов С. Стенд для измерения магнитных моментов изделий / Труды Международн. научн.-техн. конф. "Метрология в электронике-97". – Том 1. – Харьков: ДНВО "Метрология", 1997. – С. 167-169. 4. Скрынников А.П. Стабилизаторы напряженности магнитного поля. – Л.: Энергия, 1975. – 196 с. 5. Афанасьев Ю.В., Аринчин С.А. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат., 1986. – 188 с. 6. Курбатов П.А. Численный расчет электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с. 7. Методика контроля и нормирования магнитных моментов судового оборудования МКММ-90. – ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Харьковское отделение ВНИИЭМ, 1990. – 49 с.

Поступила в редколлегию 12.12.2008