

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ИСТОЧНИКА ПОЛЯ СИСТЕМОЙ ОСЕВЫХ ДАТЧИКОВ

Внешнее магнитное поле (ВМП) многих источников оказывает нежелательное влияние на работу многих различных магниточувствительных устройств и обслуживающий персонал, находящийся в зоне воздействия этого поля [1, 2]. На значительных расстояниях ВМП большинства источников общепромышленного исполнения имеет дипольный характер. Поэтому согласно действующим нормативным документам [3] задачей контроля ВМП источника является измерение компонентов его дипольного магнитного момента, который является постоянной величиной.

Развитие мультипольной концепции источника, основанной на теории геомагнетизма Гаусса [4], привело к необходимости создания магнитометрических устройств измерения дипольных магнитных моментов источников, обладающих селективностью относительно измеряемого дипольного момента.

В практике измерения дипольных моментов источников ВМП широкое распространение получили индукционные методы, основанные на явлении электромагнитной индукции путем преобразования измеряемой дипольной составляющей магнитного поля в электрический сигнал. Это объясняется линейностью функции преобразования, высокой стабильностью характеристик преобразователя и незначительной температурной погрешностью в широком диапазоне частот [5].

Применение магнитометрических методов, основанных на использовании в качестве индукционных датчиков преобразователей в виде катушек с ферромагнитными сердечниками или без них, существенно упрощает магнитометрические системы измерения с точечными датчиками, придает им свойства мобильности, что дает возможность эффективно использовать их для контроля ВМП источников в различных условиях промышленного производства электрооборудования.

Попытка решить задачу измерения дипольных моментов источников ВМП магниточувствительным датчиком на значительных расстояниях от их поверхности не дали требуемой точности из-за наличия промышленных электромагнитных помех внешних источников в рабочей зоне испытательного стенда, уровень которых может значительно превышать измеряемое поле. Это привело к необходимости создания многоточечных магнитометрических методов и средств измерения ВМП источника вблизи его поверхности, вследствие чего повышается точность измерения, так как существенно увеличивается отношение полезного сигнала к помехонесущему сигналу.

Поскольку указанные измерения проводятся в условиях наличия внешней электромагнитной помехи, то представляет практический интерес оценить погрешность, которая с этим связана. Эта погрешность зависит от уровня поля внешней помехи и характеризует степень помехозащищенности магнитоизмерительных устройств от ее воздействия [6].

Оценим помеховую составляющую погрешности на примере измерения дипольного магнитного момента магнитометрической системой, содержащей четыре осевых индукционных датчиков, расположенных вокруг измеряемого источника поля в экваториальной плоскости равномерно на окружности радиуса  $R$  в точках со значениями угловой координаты  $\varphi_k = (k-1)90^\circ$  (где  $k=1,2,3,4$ ) и ориентированных своими магнитными осями параллельно полярной оси  $Z$  принятой системы координат.

По измеренному магнитному полю зональной гармоники дипольной постоянной составляющей ВМП ( $n=1, m=0$ ), не зависящей от угловой координаты  $\varphi$ , и магнитному полю внешних помехонесущих источников катушки датчиков магнитометрической системы

соединены электрически согласно. Поэтому наведенные в этих катушках указанными магнитными полями электрические сигналы суммируются, вследствие чего магнитометрическая система осевых датчиков оказывается непохозащищенной от магнитного поля внешних источников, расположенных вблизи зоны испытательного магнитометрического стенда.

На магнитные оси катушек датчиков измерительной системы воздействуют осевые составляющие напряженности магнитного поля измеряемого источника поля и источников внешней помехи. Результирующий электрический сигнал, наведенный этими полями в катушках магнитометрической системы датчиков, равен

$$E_z = E_{z1} + \Delta E_z + E'_z. \quad (1)$$

В этом уравнении полезный сигнал  $E_{z1}$  создается магнитным полем зональной гармоники дипольной составляющей измеряемого источника:

$$E_{z1} = \frac{1}{k_f} \sum_{k=1}^4 H_{k\theta 1} = \frac{4g_{10}}{k_f R^3},$$

где  $k_f$ , мЭ/мВ – постоянная осевых датчиков;  $H_{k\theta 1} = g_{10} / 4\pi R^3$  – осевая компонента напряженности дипольной составляющей поля в  $k$ -й точке расположения датчика.

Сигнал помехи  $\Delta E_z$ , обусловленный, как показали исследования, помехонесущими мультиполями ВМП нечетного порядка, аналитически описывается рядом, в котором  $n=3,5,7,\dots$ :

$$\Delta E_z(\theta = 90^\circ) = -\frac{1}{k_f} \sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} g_{n0} \partial P_n^0(\cos \theta) / \partial \theta,$$

где  $P_n^0(\cos \theta)$  – полином Лежандра первого рода;  $n$ -порядковый номер помехонесущего мультиполя нечетного порядка;  $g_{n0}$  – коэффициент, равный мультипольному магнитному моменту гармоники  $n$ -го порядка.

Сигнал помехи  $E'_z$  (1), создаваемый магнитным полем внешних источников, приводит к появлению помеховой составляющей погрешности измерения. Определим эту погрешность в предположении, что мультипольный сигнал помехи  $\Delta E_z = 0$ . Для этого рассмотрим наиболее реальный случай, когда источник внешней электромагнитной помехи расположен, как и система осевых датчиков, в экваториальной плоскости на окружности радиуса  $R_u$  в точке с угловой координатой  $\alpha$  и его магнитный диполь  $M'_z$  ориентирован параллельно магнитной оси датчиков.

Скалярный магнитный потенциал этого помехонесущего источника равен

$$U_z = \frac{\vec{M}'_z \vec{r}}{4\pi r^3}, \quad (2)$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор от точки наблюдения до центра магнитного диполя  $M'_z$  помехонесущего источника, значение которого равно

$$r = \left[ (x - x_u)^2 + (y - y_u)^2 + z^2 \right]^{1/2},$$

$x, y, z$  – координаты точки наблюдения;  $x_u, y_u$  – координаты центра дипольного момента  $M'_z$ .

В сферической системе координат магнитный потенциал  $U_z$  (2) принимает вид

$$U_z = \frac{M'_z R \cos \theta}{4\pi \left[ (R \cos \varphi \sin \theta - x_u)^2 + (R \sin \varphi \sin \theta - y_u)^2 + (R \cos \theta)^2 \right]^{3/2}} \quad (3)$$

Осевая компонента напряженности помехонесущего магнитного поля находится путем дифференцирования потенциала  $U_z$  (3) по координате  $\theta$  и для точек экваториальной плоскости аналитически описывается уравнением

$$H'_\theta(\theta = 90^\circ) = \frac{M'_z}{4\pi} \left[ R^2 - 2RR_u \cos(\varphi - \alpha) + R_u^2 \right]^{-3/2}$$

Эта составляющая напряженности магнитного поля наводит в катушках осевых датчиков измерительной магнитометрической системы электрический сигнал помехи

$$E'_z = A(\lambda) \frac{M'_z}{k_f R^3},$$

где  $A(\lambda)$  – коэффициент, зависящий от  $\lambda = R_u / R$ :

$$A(\lambda) = (\lambda^2 - 2\lambda \cos \alpha + 1)^{-3/2} + (\lambda^2 + 2\lambda \cos \alpha + 1)^{-3/2} + (\lambda^2 - 2\lambda \sin \alpha + 1)^{-3/2} + (\lambda^2 + 2\lambda \sin \alpha + 1)^{-3/2}.$$

При  $R_u \geq 10R$  и изменении угловой координаты  $\alpha$  в пределах  $0 \div 360^\circ$  коэффициент  $A(\lambda)$  практически не зависит от угла  $\alpha$ . В этом случае электрический сигнал помехи  $E'_z$ , наведенный в катушках магнитометрической системы датчиков, определяется уравнением

$$E'_z = \frac{4M'_z}{k_f R_u^3}.$$

Тогда погрешность измерения осевого дипольного момента, создаваемая внешней электромагнитной помехой, будет равна

$$\delta'_z = \frac{E'_z}{E_{z1}} = \frac{M'_z}{M_z} \left( \frac{R}{R_u} \right)^3.$$

Анализ показывает, что основным недостатком магнитометрической системы из четырех осевых датчиков является ее помехозащищенность от внешней электромагнитной помехи, что приводит, в свою очередь, к появлению значительной помеховой составляющей погрешности при измерениях в промышленных условиях. Измерение осевого дипольного магнитного момента помехозащищенной магнитометрической системой, содержащей четыре осевых однокомпонентных датчиков, можно осуществлять с заданной погрешностью  $\delta'_z \leq 1\%$  при условии, если источники внешней помехи находятся вне зоны радиуса  $R_u \geq 10R$ , в которой расположен испытательный магнитометрический стенд, а эквивалентный дипольный момент помехонесущих источников превышает измеряемый дипольный магнитный момент не более, чем на порядок. Однако выполнить эти условия при осуществлении измерения в зонах промышленных и энергетических объектов весьма проблематично. Поэтому уменьшение помеховой составляющей погрешности в этом случае может быть достигнуто путем применения дополнительных технических средств активной компенсации

помехонесущего сигнала, наведенного в катушках магнитометрической системы датчиков, что значительно расширяет ее область применения.

#### **Выводы:**

1. Измерительный канал магнитометрической системы из четырех осевых датчиков не защищен от внешней электромагнитной помехи, что приводит к появлению значительной погрешности при измерениях в условиях наличия промышленной электромагнитной помехи, создаваемой сильноточными внешними источниками.

2. Получено уравнение электромагнитной составляющей погрешности измерения, аналитически связывающее радиус зоны, по периметру окружности которой могут быть расположены источники помехонесущего магнитного поля, с контрольным расстоянием, на котором осуществляется измерение осевого дипольного момента источника, что дает возможность оценить уровень допустимой погрешности на стадии создания испытательного магнитометрического стенда в зонах промышленных и энергетических объектов.

3. Определены условия кратности радиуса зоны испытательного магнитометрического стенда и контрольно-измерительного радиуса, на котором расположены осевые датчики измерительной магнитометрической системы, а также помехонесущего и измеряемого дипольных магнитных моментов, при которых можно осуществлять измерения с достаточной для практики точностью.

4. Погрешность измерения осевого дипольного момента источника поля помехозащищенной магнитометрической системой в условиях наличия внешней электромагнитной помехи может быть существенно уменьшена за счет компенсации этой помехи дополнительными техническими средствами.

**Список литературы:** 1. *Кравченко В.И.* Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987. 256 с. 2. *Петров Ф.И.* Действие электромагнитного поля низкой частоты на высшую нервную деятельность // Тр. / Ин-т физиологии им. И.П. Павлова. М.-Л., 1982. Т.1, С.369 – 375. 3. *ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического поля.* – Введ. 01.07.93. М.: Изд-во стандартов, 1993. 5 с. 4. *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 592 с. 5. *Сергеев В.Г., Шихин А.Я.* Магнитоизмерительные приборы и установки. М.: Энергоатомиздат, 1982. 152 с. 6. *ДСТУ 2625-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до загасаючого змінного магнітного поля.* Введ. 29.07.94. К.: Вид-во УкрНДІССІ. 1994. 28 с.

*Харьковский национальный  
университет радиотехники*

*Поступила в редколлегию 15.12.2003*