

Калибровка многокомпонентных магнитоизмерительных систем как обратная задача магнитометрии

Л. А. БАТАЛОВ¹, В. В. НЕСТЕРОВ²

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, Гатчина, Россия

²ООО «Магнитные приборы», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: zlokor88@gmail.com

Предложен способ калибровки систем с многокомпонентными излучателем и датчиком. Способ обеспечивает одновременное нахождение совокупности параметров такой системы. Индукция магнитного поля измеряется в точках размещения компонентов датчика при его перемещении по плоскости с разметкой, определяемой одним геометрическим параметром (размером ячейки). По обработанным результатам измерений составляется целевая функция, и находится её глобальный минимум методами нелинейного программирования. Данная задача имеет единственное решение, если априори известен один из магнитных параметров системы: коэффициент передачи одного компонента датчика или магнитный момент одного компонента излучателя. Представлена методика оценки погрешности позиционирования многокомпонентных излучателя и датчика магнитного поля.

Ключевые слова: магнитный момент, индукция магнитного поля, нелинейное программирование, магнитный трекинг.

We propose the technique to calibrate the systems with multicomponent emitter and sensors. This technique includes the algorithm providing all parameters simultaneous determination. The magnetic field induction is measured at the set of reference points on the plane. The reference points form the uniform grid with square cell. As a result of measurements the goal function is built. The global multidimensional minimal of goal function is to be found. The problem has the unique solution if one magnetic parameter (emitter component magnetic moment or sensor component transfer factor) is known a priori. We present also the method to estimate position error of multicomponent emitter and magnetic field sensor.

Key words: magnetic moment, magnetic field induction, nonlinear programming, magnetic tracking.

Магнитометрия имеет дело с двумя видами объектов: источником (излучателем) и датчиком поля. Задача калибровки – определение параметров излучателя и датчика – существенно усложняется, если излучатель и датчик являются многокомпонентными распределёнными системами. В этом случае кроме магнитных параметров необходимо находить параметры взаимного пространственного положения компонентов излучателя и датчика. В качестве примера системы с многокомпонентным датчиком можно привести магнитомер КБД-2П [1], применяемый специалистами ПАО «Газпромнефть» для внутрубной диагностики трубопроводов. Магнитоизмерительная система прибора включает три трёхкомпонентных градиентометрических феррозондовых преобразователя НВ0709, установленных взаимно ортогонально. Задача внутрубной диагностики относится к обратным задачам магнитометрии: по результатам измерения параметров магнитного поля определяются параметры источника возмущения постоянного магнитного поля, связанного с дефектом трубопровода.

Ещё один пример систем с многокомпонентным излучателем – системы магнитного трекинга, используемые в практической хирургии для визуализации положения хирургического инструмента. В этих системах используется многокомпонентный излучатель низкочастотного магнитного поля (обычно 6–8 компонентов [2]) и трёхкомпонентный датчик, закреплённый на хирургическом инструменте. По сигналам датчика определяется его пространственное положение: три угла Эй-

лера и три декартовы координаты [2]. В указанной работе в рамках решения обратной задачи требуется найти такое пространственное положение датчика, при котором максимально точно воспроизводятся параметры поля, создаваемого многокомпонентным излучателем.

С целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению многокомпонентной магнитоизмерительной системы необходимо калибровать её по следующим параметрам: коэффициентам передачи и параметрам пространственного положения магнитных центров компонентов датчика, а также направляющим косинусам их осей; дипольным магнитным моментам и параметрам пространственного положения магнитных центров компонентов излучателя, а также направляющим косинусам их осей. В частном случае, определённые в результате калибровки параметры взаимного углового положения осей компонентов трёхкомпонентных датчика и (или) излучателя позволяют решать задачу их ортогонализации. Известные способы аналитического решения задачи ортогонализации компонентов датчика опираются на измерения с помощью меры магнитной индукции или на дополнительные измерения модульным компенсационным магнитометром [3]. Метод корректирующих матриц [4] также позволяет ортогонализировать компоненты датчика, но в отличие от предлагаемой методики не учитывает пространственное разнесение магнитных центров компонентов датчика.

Определяемые на калибровочном стенде параметры датчика и источников магнитного момента

Прибор	Номер	Наименование	Обозначение
Источник (<i>i</i> -й) магнитного момента	1, 2	Углы осей магнитного момента	Θ_i, Φ_i
	3	Магнитный момент	M_i
	4	X-координата радиус-вектора	X_i
	5	Y-координата радиус-вектора	Y_i
	6	Z-координата радиус-вектора	Z_i
Датчик	7, 8, 9	Взаимные коэффициенты передачи	K_1, K_2, K_3
	10, 11	Углы осей компонента 1	θ_1, φ_1
	12, 13	Углы осей компонента 2	θ_2, φ_2
	14, 15	Углы осей компонента 3	θ_3, φ_3
	16	X-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{12}$	$x_{(12)}$
	17	Y-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{12}$	$y_{(12)}$
	18	Z-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{12}$	$z_{(12)}$
	19	X-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{13}$	$x_{(13)}$
	20	Y-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{13}$	$y_{(13)}$
	21	Z-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{13}$	$z_{(13)}$

Задача калибровки системы, содержащей многокомпонентные датчик и излучатель. Рассмотрим калибровочный стенд с глобальной системой координат XYZ. Для описания пространственных положений калибруемой системы используем декартовы координаты (x ; y ; z), для задания направления осей – нормированные на единицу векторы $\mathbf{n}$, которые параметризуют сферическими координатами (θ , φ) следующим образом:

$$\mathbf{n} = (\cos\theta\sin\varphi, \cos\theta\cos\varphi, \sin\theta).$$

Многокомпонентный датчик характеризуется набором m компонентов, каждый из которых имеет ось $\mathbf{n}_k$, $k=1, \dots, m$ и магнитный центр в системе координат стенда, описываемый радиус-вектором $\mathbf{r}_k$. Тогда датчик, помещённый в точку с индукцией магнитного поля $\mathbf{B}(\mathbf{r})$, будет регистрировать m сигналов магнитной индукции:

$$B_k = K_k \mathbf{n}_k \mathbf{B}(\mathbf{r} + \mathbf{r}_{1k}), \quad k=1, \dots, m, \quad (1)$$

где K_k – коэффициент передачи k -го компонента; $\mathbf{r}$ – радиус-вектор магнитного центра 1-го компонента датчика; $\mathbf{r}_{1k}$ – взаимные векторы расположения компонентов относительно 1-го компонента, $\mathbf{r}_{11}=(0,0,0)$.

Задача калибровки датчика состоит в определении $3(2m-1)$ параметров: m пар углов (θ_k, φ_k), параметризующих оси компонентов; $3(m-1)$ координат взаимных векторов $\mathbf{r}_{1k}$; m коэффициентов передачи K_k .

Многокомпонентный излучатель имеет L дипольных источников магнитного поля, характеризующихся значением M_i и осью магнитного момента $\mathbf{N}_i$. Положение каждого источника описывается радиус-вектором $\mathbf{R}_i$, $i=1, \dots, L$. Тогда распределение индукции поля $\mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r})$ i -го источника в точке с радиус-вектором $\mathbf{r}$ в дипольном приближении будет определяться системой

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{B}_i(\mathbf{N}_i, \mathbf{r}) &= M_i \mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r} - \mathbf{R}_i); \\ \mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r}) &= [3(\mathbf{N}_i, \mathbf{r})\mathbf{r} - \mathbf{N}_i r^2] / (4\pi r^5). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Без ограничения общности могут использоваться и другие, более сложные формы распределения поля $\mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r})$. Например, для источника поля (соленида) интегрированием системы (2) в соответствующих пределах учитывались его длина и радиус [5]. При калибровке излучателя необходимо определять $6L$ параметров: два угла, параметризующие ось каждого дипольного источника; магнитный момент источника; три координаты радиус-вектора магнитного центра.

С учётом выражений (1), (2) получим mL значений сигнала m компонентов датчика:

$$B_k^{(i)} = K_k \mathbf{n}_k M_i \mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r} - \mathbf{R}_i + \mathbf{r}_{1k}), \quad i=1, \dots, L, \quad k=1, \dots, m,$$

где $B_k^{(i)}$ – сигнал k -го компонента датчика, возбуждённый i -м источником магнитного момента.

Пусть имеется S опорных точек с известными радиус-векторами $\mathbf{r}_j$, $j=1, 2, \dots, S$ и в этих точках m компонентами датчика измеряются значения индукции магнитного поля каждого из L компонентов излучателя. Тогда в совокупности имеется mLS значений сигнала, параметризуемого номером точки j : $B_k^{(i)(j)}$, $k=1, \dots, m$, $i=1, \dots, L$, $j=1, \dots, S$. Для определения неизвестных параметров излучателя и датчика составим целевую функцию W , являющуюся квадратом невязки между измеренными и теоретическими значениями магнитной индукции:

$$W = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m [B_k^{(i)(j)} - K_k \mathbf{n}_k M_i \mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r}_j - \mathbf{R}_i + \mathbf{r}_{1k})]^2. \quad (3)$$

Параметры, определяющие источники магнитного момента и трёхкомпонентный датчик, применяемый в хирургической навигации, приведены в таблице.

Важным обстоятельством является взаимосвязь набора магнитных моментов $\{M_i\}$ источников поля, формирующих излучатель, и коэффициентов передачи $\{K_k\}$ компонентов датчика. Согласно формуле (3) данные параметры входят в целевую функцию W только в виде произведений $M_i K_k$. Это значит, что в

общем случае коэффициенты передачи компонентов датчика и магнитные моменты компонентов излучателя будут известны с точностью до множителя. Для получения однозначного решения минимизация (3) выполняется при фиксированном значении магнитного момента одного компонента излучателя или коэффициента передачи одного компонента датчика.

Рассмотрим задачу позиционирования датчика многокомпонентной системы в магнитном поле при известных параметрах 1–20 (см. таблицу). В этом случае датчик описывается шестью параметрами – тремя координатами, составляющими радиус-вектор датчика $\mathbf{r}$, и тремя углами Эйлера: прецессии α , нутации β и собственного вращения γ , которые определяют матрицу поворота $U \equiv U(\alpha, \beta, \gamma)$:

$$U(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{21} & u_{31} \\ u_{12} & u_{22} & u_{32} \\ u_{13} & u_{23} & u_{33} \end{pmatrix},$$

где

$$u_{11} = \cos\alpha \cos\gamma - \sin\alpha \cos\beta \sin\gamma;$$

$$u_{12} = \sin\alpha \cos\gamma - \cos\alpha \cos\beta \sin\gamma;$$

$$u_{13} = \sin\beta \sin\gamma;$$

$$u_{21} = -\cos\alpha \cos\gamma - \sin\alpha \cos\beta \cos\gamma;$$

$$u_{22} = -\sin\alpha \sin\gamma + \cos\alpha \cos\beta \cos\gamma;$$

$$u_{23} = \sin\beta \cos\gamma;$$

$$u_{31} = \sin\alpha \sin\beta;$$

$$u_{32} = -\cos\alpha \sin\beta;$$

$$u_{33} = \cos\beta.$$

Целевая функция датчика имеет вид

$$W = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^m \left[B_k^{(i)} - K_{1k} U n_k M_i \mathbf{b}(\mathbf{N}_i, (\mathbf{r} - \mathbf{R}_i) U(\alpha, \beta, \gamma) + \mathbf{r}_{1k}) \right]^2. \quad (4)$$

Функция (4) минимизируется в шестимерном пространстве координат магнитного центра 1-го компонента датчика $\mathbf{r} = (x, y, z)$ и углов Эйлера α, β, γ .

Минимизация целевых функций (3), (4) проводится с помощью алгоритма Левенберга–Марквардта как одной из реализаций метода наименьших квадратов [6]. Этот алгоритм нечувствителен к начальному приближению и поэтому широко используется в задачах хирургической навигации.

Описание калибровочного стенда и расчёт погрешностей. Рассмотрим калибровку трёхкомпонентного датчика и шестикомпонентного излучателя магнитного блока

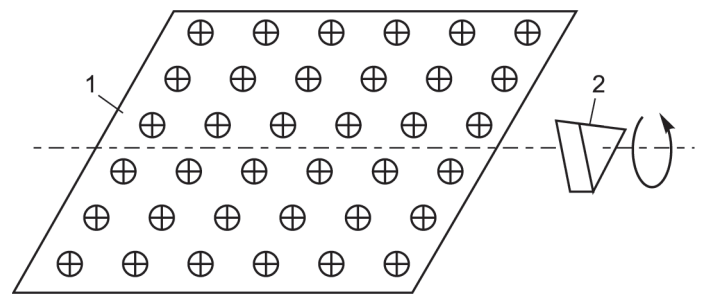


Рис. 1. Схема калибровочного стенда:
1 – стенд с нанесёнными метками 36 опорных точек, образующих прямоугольную сетку с шагом 140 мм; 2 – многокомпонентный излучатель, вращающийся вокруг оси симметрии

хирургической навигационной станции (системы). Рабочая зона системы имеет вид сферы диаметром 600 мм, которая отнесена от центра излучателя на 150 мм. Стенд представляет собой стол, на поверхности которого размещена стеклянная пластина с нанесённой на неё сеткой с квадратными ячейками размером 140×140 мм (рис. 1). Узлы сетки соответствуют 36 опорным точкам. Под столом на расстоянии 200 мм от его поверхности установлен шестикомпонентный излучатель дипольного типа. Трёхкомпонентный датчик закреплён на стеклянном основании, позволяющем плоскопараллельное перемещение датчика по пластине с разметкой.

Индукцию магнитного поля измеряют последовательно при плоскопараллельном перемещении трёхкомпонентного датчика от одной опорной точки к другой, что обеспечивает однонаправленность осей компонентов датчика относительно стенда в процессе калибровки. Для устранения шумов в каждой точке выполняется осреднение результатов измерений. По полученному массиву результатов измерений в 36 опорных точках составляется целевая функция (3). Точка глобального минимума целевой функции (3) соответствует численным значениям параметров (см. таблицу), которые обеспечивают наилучшую аппроксимацию распределения индукции магнитного поля для данного массива результатов измерений.

Для контроля качества калибровки параметров датчика и излучателя предлагается методика, основанная на определении координат опорных точек по значениям измеренной в них магнитной индукции. Так как координаты $\mathbf{r}_j$ опорных точек известны по построению разметки, можно построить векторы отклонений

$$\Delta \mathbf{r}_j = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}'_j, \quad j=1, \dots, S, \quad (5)$$

где $\mathbf{r}'_j$ – координата j -й опорной точки, найденная по результатам измерения в ней индукции.

Чтобы получить векторы (5), известные значения параметров датчика и излучателя подставляют в формулу (4). При различных положениях излучателя относительно плоскости с разметкой будут получаться различные наборы координат, отличающиеся

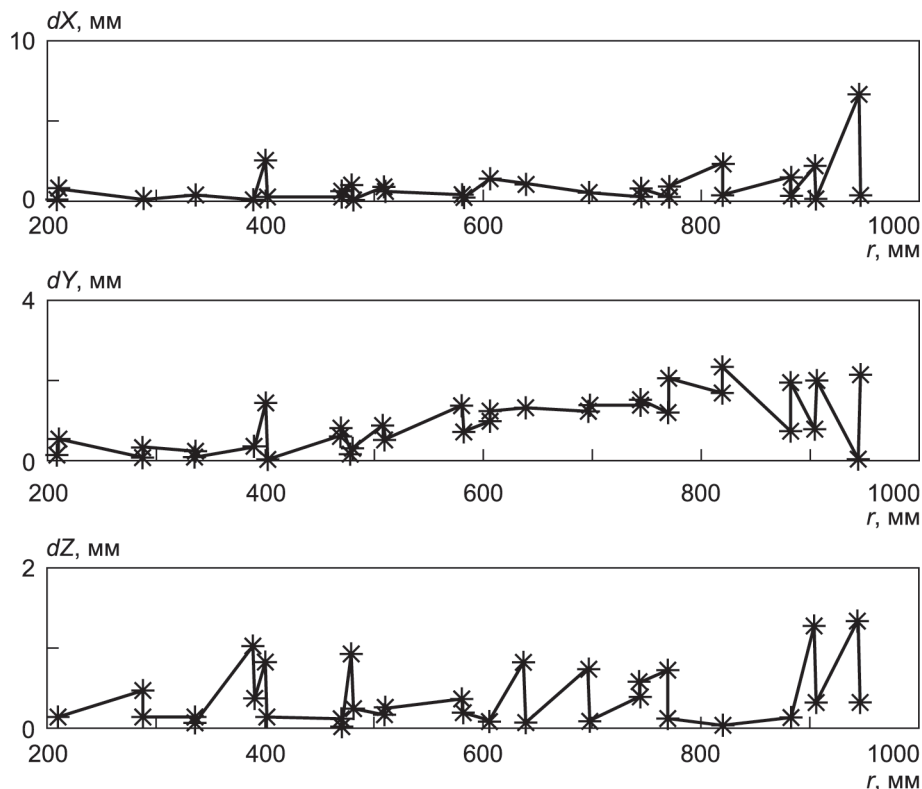


Рис. 2. Зависимости погрешностей dX , dY , dZ позиционирования опорных точек по трём координатам от расстояния r до центра излучателя

сдвигом и поворотом набора точек. Соответствующие вектор сдвига и матрица поворота находят с использованием итеративного алгоритма ближайших точек (ICP-алгоритма) [7]. Координаты опорных точек измеряют при разных положениях излучателя с целью равномерного охвата всей рабочей области.

При вычислении погрешности углового позиционирования необходимо учесть, что любой поворот твёрдого тела можно интерпретировать как поворот вокруг определённой оси на угол η . Косинус угла поворота датчика вокруг оси при его перемещении из произвольного положения 1 в положение 2 выражается как

$$\cos \eta = \left[\text{Sp} \left(U^{(1)} \left(U^{(2)} \right)^m \right) - 1 \right] / 2, \quad (6)$$

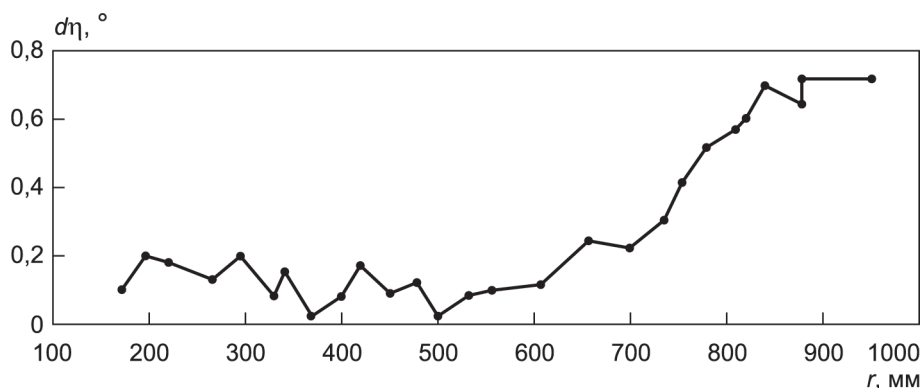


Рис. 3. Зависимость угловой погрешности $d\eta$ позиционирования при прецизионном повороте датчика на 90° от расстояния r до центра излучателя

где $U^{(1)}$, $U^{(2)}$ – матрицы поворота в системе координат станда, параметризованные тремя углами Эйлера и вычисленные минимизацией функции (3) в позициях датчика 1, 2, соответственно; $\text{Sp}(\cdot)$ – операция взятия следа матрицы.

Формула (6) справедлива и в случае смещения магнитного центра датчика. Для анализа угловой погрешности позиционирования датчика его закрепляют на твёрдом основании, которое прецизионно поворачивают на 90° .

Качество калибровки оценивают по двум критериям для погрешности определения координат и угловой погрешности, соответственно:

$$\chi_1 = \max_{\{j\}} |\Delta r_j|; \quad \chi_2 = \max_{\{j\}} |\eta_j - \pi/2|,$$

где $|\mathbf{r}|$ – некоторая норма вектора $\mathbf{r}$.

На рис. 2 приведены графики зависимостей погрешностей dX , dY , dZ координат опорных точек в зависимости от расстояния r до центра излучателя. Немонотонный характер кривых и значения погрешностей согласуются с данными, приведёнными в работах [2, 5, 8].

Критерий χ_1 , вычисленный по равномерной норме, не превышает 1 мм на расстоянии $r < 400$ мм. С увеличением расстояния увеличиваются погрешности всех трёх координат, и на границе рабочей области $dY = 1,8$ мм. Увеличение погрешности можно объяснить недостаточной точностью определения параметров датчика и источников магнитного момента или искажением сигнала из-за влияющих факторов. Тем не менее, описанная процедура калибровки датчика устойчива и позволяет решить задачу позиционирования в магнитном поле излучателя.

Зависимость погрешности $d\eta$ угла поворота от расстояния до геометрического центра излучателя представлена на рис. 3. При $r = 160 \dots 500$ мм угловая погрешность распределена равномерно и не превышает $0,22^\circ$. При удалении датчика от излучателя на расстояние $r > 600$ мм угловая погрешность $d\eta = 0,5^\circ$, что можно объяснить уменьшением соотношения сигнал-шум для магнитоизмерительного канала при данных расстояниях и под воздействием влияющих факторов.

Увеличение погрешности можно объяснить недостаточной точностью определения параметров датчика и источников магнитного момента или искажением сигнала из-за влияющих факторов. Тем не менее, описанная процедура калибровки датчика устойчива и позволяет решить задачу позиционирования в магнитном поле излучателя.

Заключение. Предложенный способ калибровки в неоднородном поле систем с многокомпонентными датчиками индукции магнитного поля и излучателем, содержащем дипольные источники магнитного поля. Способ позволяет на одном массиве измеренных значений индукции магнитного поля находить все магнитные и геоме-

трические параметры системы, если в её состав входит один откалиброванный элемент (одного из компонентов датчика или излучателя). Это важное преимущество данного способа, поскольку калибровка отдельных элементов таких систем часто бывает затруднена или невозможна по конструктивным особенностям. Рассмотрена методика оценки качества такой калибровки систем. Методика реализована для задачи позиционирования трёхкомпонентного индукционного датчика в поле многокомпонентного излучателя для хирургической навигационной станции. Получены максимальные погрешности координат (1,8 мм) и для угла поворота ($0,5^\circ$) датчика в рабочей зоне в виде сферы диаметром 600 мм. Важным частным следствием применения методики является возможность использования результатов калибровки по направляющим косинусов компонентов трёхкомпонентных элементов магнитоизмерительных систем для их ортогонализации (путём необходимого виртуального поворота осей компонентов).

Л и т е р а т у р а

1. Максимов Г. Л., Носов Ф. В., Фогель А. Д., Семёнов В. В., Елисеев А. А. Комплексная диагностика технического состояния трубопроводов // Коррозия Территории Нефтегаз. 2017. № 2(37).

2. Li M., Bien T., Rose G. FPGA based electromagnetic tracking system for fast catheter navigation // Intern. J. Sci. Eng. Res. 2013. V. 4. Iss. 9. P. 2566–2570. DOI: 10.14299/ijser.2013.09.001.

3. Иванов Ю. М., Семёнов В. Г., Осипенко К. В. Угловое согласование трехкомпонентных дифференциальных магнитометров // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 42–46.

4. Иванов Ю. М., Семёнов В. Г. Корректирующие матрицы – путь к повышению точности трехкомпонентных магнитометров // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 46–51.

5. Schroeder T. An accurate magnetic field solution for medical electromagnetic tracking coils at close range // Appl. Phys. 2015. V. 117. 224504. DOI:10.1063/1.4922667.

6. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация / Пер. с англ. М.: Мир, 1985.

7. Besl P. J., McKay N. D. A Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. V. 14. No. 2. P. 239–256.

8. Franz A. M., Haidegger T., Birkfellner W., Cleary K., Peters T. M., Maier-Hein L. Electromagnetic tracking in medicine – a review of technology, validation and applications // IEEE Trans. Medical Imaging. 2014. V. 33. No. 8. P. 1702–1725.

Дата принятия: 14.05.2018.

620.1.08:62-791.2

Измерение и первичная обработка сигнала датчика магнитной индукции в рабочей зоне электромеханической системы

А. Н. АНДРЕЕВ, Д. А. КОЛЕСНИЧЕНКО, Н. М. КОЛЕСНИЧЕНКО

Вологодский государственный университет, Вологда, Россия, e-mail: dimakolesnichenko@gmail.com

Рассмотрены варианты цифровой обработки сигналов твердотельных датчиков магнитной индукции, расположенных в рабочих зонах электромеханических преобразователей. Полученные результаты можно использовать при решении задач управления и технической диагностики.

Ключевые слова: индукция, рабочая зона электрической машины, цифровая обработка сигналов.

The article considers the options for digital processing of magnetic induction signals obtained by solid-state sensors in working areas of electromechanical transducers in order to use the results in control and technical diagnostics tasks.

Key words: induction, working area of the electric machine, digital signal processing.

Очувствление систем электромеханики, т. е. включение в их состав физических сенсоров, чаще всего осуществляется на основе комбинированных методов измерения электрических и механических величин. При комбинированном методе после непосредственного или косвенного измерения той или иной физической величины выполняются предварительная

обработка полученных данных и восстановление математическими методами недостающих параметров и переменных. Практически всегда при восстановлении указанных данных появляются дополнительные погрешности, в ряде случаев существенно превышающие инструментальные погрешности физических сенсоров. Иными словами, включение в сложную