

ки \hat{N} от Q следует, в частности, из соотношений (14) при подстановке в последние выражений (5), (12) и (13) (причем \hat{N}_v и \hat{N}_n находятся в результате логарифмирования (13) при подстановке (12)). Аналогичный вывод можно получить и из (5), полагая, что границам \hat{N}_v и \hat{N}_n адекватны некоторые граничные значения оценок n_v и n_n числа точек, зависящие, например, от выборочного наблюдаемого значения n , его дисперсии и априорно выбранной величины квантиля распределения $p(n/N)$.

Таким образом, из проведенного в статье анализа можно сделать важный для практических приложений вывод, заключающийся в том, что точность интервальной оценки числа N парциальных потоков по выборочным значениям n с использованием процедуры (5) составляет величину не хуже 30—40% при $K/n \geq 1,15-1,2$ и $K \geq 25-30$ при произвольных значениях Q .

ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков И. А. Статистические проблемы выделения потока сигналов из шума.— М.: Сов. радио, 1969.
2. Решин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем.— М.: Сов. радио, 1977.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров.— М.: Наука, 1970.
4. Пирсон К. Таблицы неполной бета-функции: Пер. с англ./Под ред. Л. Н. Большаева.— М.: Наука, ВЦ АН СССР, 1974.
5. Справочник по специальным функциям: Пер. с англ./Под ред. М. Абрамовица, И. Стигана.— М.: Наука, 1979.

*Поступила в редакцию 19 августа 1983 г.,
окончательный вариант — 23 февраля 1984 г.*

УДК 681.327.12

С. Л. ЕРМАКОВ, Б. Я. ЖЕВЕЛЕВ, В. А. РУДОЙ

(Минск)

УКАЗАТЕЛЬ ТИПА «КАРАНДАШ» В КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВАХ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Быстрое развитие средств интерактивного взаимодействия человека и ЭВМ ставит ряд проблем в области цифровой обработки графических образов: чертежей, карт, фотоснимков и т. д. Одной из актуальных задач в рамках проблемы создания устройств графического ввода с координатно-измерительными средствами (КИС) повышенной точности является разработка и конструктивная реализация рабочего инструмента оператора (указателя), выполненного в форме карандаша [1, 2].

Большая часть распространенных в настоящее время КИС функционирует на основе измерения электромагнитного взаимодействия матрицы проводников планшета и подвижной цилиндрической катушки индуктивности указателя визирного типа [3, 4]. Применение такого принципа для реализации КИС с указателем типа «карандаш» нецелесообразно в связи со значительной аппаратной погрешностью, являющейся следствием резкого искажения амплитудно-пространственной характеристики (АПХ) из-за переменной ориентации оси катушки индуктивности [4].

В общем случае уравнение АПХ для 'электромагнитной системы «длинный проводник — круговой контур малого радиуса»' имеет вид

$$A = mF(R, r) \cos \theta, \quad (1)$$

где A — амплитуда сигнала, индуцированного в контуре радиусом r ; R — радиус-вектор, модуль которого соответствует удалению центра контура от оси проводника; θ — угол между вектором \mathbf{B} магнитной индукции и нормалью к плоскости контура; m — коэффициент пропорциональности.

Зависимость амплитуды индуцированного сигнала от угла θ , являющаяся причиной резкого увеличения погрешности работы указателя даже при малых изменениях его ориентации, может быть устранена при использовании специального (магнитометрического) датчика [5—7].

В состав магнитометрического датчика входят три близкие по параметрам малогабаритные ($\varnothing 6 \div 10$ мм) катушки индуктивности, плоскости которых развернуты на 90° друг относительно друга вокруг общего центра. При помещении датчика в электромагнитное поле в упомянутых катушках индуцируются соответствующие электрические сигналы, связанные соотношениями

$$\begin{aligned} e' &= e_m \cos \varphi \cdot \cos \psi, \\ e'' &= e_m \cos \varphi \cdot \sin \psi, \\ e''' &= e_m \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

где φ , ψ — углы в свободно ориентированной сферической системе координат, полюс которой совмещен с центром датчика, а радиус-вектор соответствует максимальному значению сигнала e_m .

Из (2) очевидно тождество

$$e_m = [(e')^2 + (e'')^2 + (e''')^2]^{1/2}, \quad (3)$$

доказывающее возможность выделения сигнала e_m , квазиинвариантного к ориентации датчика.

В работе [6] описан принцип построения указателя типа «карандаш», включающего два расположенных соосно с его острием магнитометрических датчика. Положение острия вычисляется на основании информации о координатах обоих датчиков. Несмотря на принципиальную возможность осуществления этого решения, конструкция указателя при ближайшем рассмотрении оказывается достаточно сложной в реализации. Описанная ниже структурная схема конструкции отличается от известной своей простотой, но предполагает иной алгоритм обработки первичной информации, поступающей от датчика (рис. 1).

Конструктивные особенности разработанного указателя заключаются в использовании только одного магнитометрического датчика, расположенного так, чтобы плоскость одной из его катушек (q_1) оказалась перпендикулярной оси пишущего элемента. В этом случае нетрудно не только зафиксировать расстояние от датчика до проводника с током, но и определить направление оси указателя, острие которого касается планшета. На рис. 2 показана схема взаимного расположения указателя и группы проводников планшета. Если обозначить через e_1 , e_2 амплитуды электрических сигналов, индуцированных в катушке q_1 при поочередном протекании идентичных импульсов тока в проводниках Π_1 и Π_2 , то

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= e_1' e_1^{-1} = e_1' [(e_1')^2 + (e_1'')^2 + (e_1''')^2]^{-0,5} \text{ и} \\ \cos \beta &= e_2' e_2^{-1} = e_2' [(e_2')^2 + (e_2'')^2 + (e_2''')^2]^{-0,5} \end{aligned} \quad (4)$$

определяют направление оси указателя относительно векторов \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2 магнитной индукции, соответствующих упомянутым токам.

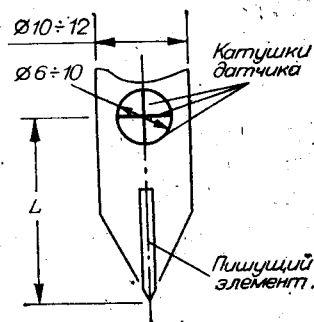


Рис. 1. Принципиальная конструктивная схема указателя типа «карандаш».

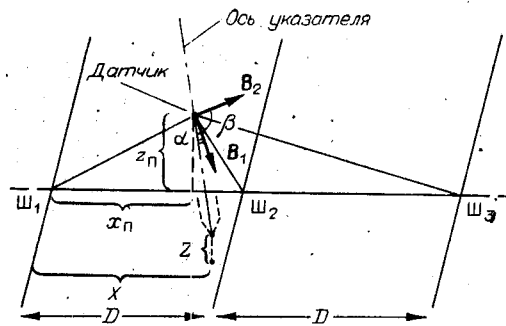


Рис. 2. Условная геометрическая схема взаимного расположения матрицы шин и оси указателя.

Определение модулей радиус-векторов R_1 и R_2 , описывающих удаление центра магнитометрического датчика от проводников Ш_1 и Ш_2 , можно осуществить на базе выражения [8] для участка АПХ:

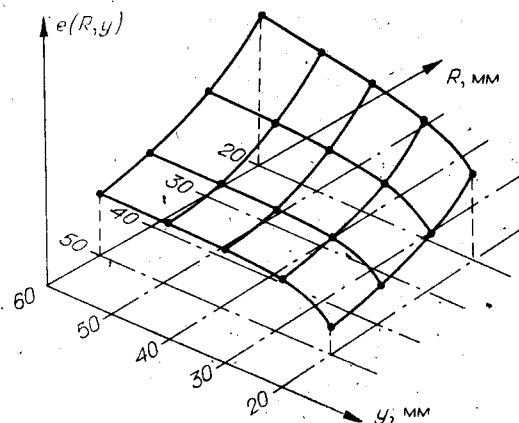
$$e(x_0, y_0, z_0, r, l) = n \int_{x_0-r}^{x_0+r} \int_{y_0-r}^{y_0+r} \frac{x}{x^2+z_0^2} \left(\frac{y}{\sqrt{x^2-y^2+z_0^2}} + \frac{l-y}{\sqrt{x^2+(l-y)^2+z_0^2}} \right) \times dx dy. \quad (5)$$

Здесь n — коэффициент пропорциональности; r — радиус контура датчика; x_0, y_0, z_0 — прямоугольные координаты центра датчика, если ось Y совпадает с проводником, ось X перпендикулярна проводнику, ось z перпендикулярна осям X, Y , а начало координат совмещено с концом проводника; l — длина проводника.

Для рассматриваемого магнитометрического датчика выходные сигналы в сумме квазиэквивалентны сигналам плоского контура, повернутого перпендикулярно силовым линиям (3). С учетом того что $x_0 = R_0, z_0 = 0$, формула (5) может быть записана в виде

$$e(R_0, y_0, l) = n \int_{R_0-r}^{R_0+r} \int_{y_0-r}^{y_0+r} R^{-1} \left(\frac{y}{\sqrt{R^2+y^2}} + \frac{l-y}{\sqrt{R^2-(l-y)^2}} \right) dR dy, \quad (6)$$

R_0 — расстояние от проводника до центра магнитометрического датчика радиусом r . Характер краевого эффекта и его зависимость от расстояния R_0 иллюстрируются рис. 3 и свидетельствуют о возможности его компенсации за счет учета пропорционального уменьшения сигнала от нескольких (≥ 2) проводников [4]. Несмотря на то что в настоящей работе вопросу краевого эффекта не уделяется специального



внимания, следует отметить, что выделение буферных периферийных зон на поле считывания протяженностью $5 \div 7r$ позволяет уменьшить дополнительную погрешность до $2 \div 3\%$ от методической [9].

Уменьшения до весьма малых значений электромагнитных наводок на датчик от то-

Рис. 3. Вид зависимости $e(R, y)$ для магнитометрического датчика с $r = 10$ мм.

ков в подводящем монтаже удается достичь путем соответствующего экранирования и введения упомянутых периферийных зон. Таким образом, основным источником возможной погрешности остается методическая погрешность, связанная с тем, что магнитометрический датчик практически эквивалентен плоскому контуру, который ориентирован всегда перпендикулярно силовым линиям электромагнитного поля.

Функция (6) может быть аппроксимирована рядом Тейлора, на основании которого записано приближенное выражение, соответствующее экспериментальным данным с точностью не хуже $0,2 \div 0,8\%$ для рабочего участка (см. рис. 3):

$$e \cong KR^{-1} \text{ при } R > 4,5 \div 5r, \quad (7)$$

где e определяется по формуле (3).

Значение коэффициента K может быть получено решением системы уравнений, сформулированных на основе соответствующих геометрических построений (см. рис. 2):

$$\begin{cases} e_1 = KR_1^{-1}, \\ e_2 = KR_2^{-1}, \\ e_3 = KR_3^{-1}, \\ z_{\Pi}^2 = R_1^2 - x_{\Pi}^2, \\ z_{\Pi}^2 = R_2^2 - (D - x_{\Pi})^2, \\ z_{\Pi}^2 = R_3^2 - (2D - x_{\Pi})^2, \end{cases} \quad (8)$$

где D — шаг укладки проводников; z_{Π} — высота расположения датчика под плоскостью Π укладки проводников; R_1, R_2, R_3 — расстояния от датчика до шин Π_1, Π_2, Π_3 соответственно; x_{Π} — расстояние от шины Π_1 до проекции центра датчика на плоскость Π .

Решение системы уравнений (8) позволяет записать

$$K = D \sqrt{2} [e_1^{-2} - 2e_2^{-2} + e_3^{-2}]^{-1/2}. \quad (9)$$

Таким образом, проведя поочередное возбуждение импульсами тока проводников Π_1, Π_2, Π_3 , входящих в состав матрицы шин планшета [5], получим по соотношению (3) сигналы e_1, e_2, e_3 , на основании которых согласно (7) и (9) можно вычислить величины радиус-векторов R_1, R_2 (см. рис. 2).

Дополнительно отметим, что при синхронном изменении тока в шинах или при смещении датчика к краю рабочего поля происходит соответственное изменение сигналов e_1, e_2, e_3 , которое в значительной степени (до $90 \div 95\%$) компенсирует эти дестабилизирующие факторы.

Координату X пересечения рабочей плоскости планшета осью указателя (точка касания острия) получаем на основании решения системы соотношений для $\cos \alpha, \cos \beta$, определенных через уравнения прямых, совпадающих с векторами B_1, B_2 и упомянутой осью (см. рис. 2):

$$\begin{cases} \frac{e_1'}{e_1} = \frac{z_{\Pi}X - x_{\Pi}Z}{L \sqrt{x_{\Pi}^2 + z_{\Pi}^2}}, \\ \frac{e_2'}{e_2} = \frac{z_{\Pi}X + Z(D - x_{\Pi}) - Dz_{\Pi}}{L \sqrt{(D - x_{\Pi})^2 + z_{\Pi}^2}}, \end{cases} \quad (10)$$

где L — расстояние от центра датчика до острия указателя; Z — расстояние от острия указателя до плоскости укладки проводников.

Уравнения для величин x_{Π}, z_{Π} легко получить решением системы (8):

$$\begin{aligned} x_{\Pi} &= \frac{K^2(e_1^{-2} - e_2^{-2}) + D^2}{2D}, \\ z_{\Pi} &= \left[\frac{K^2}{e_1^2} - \frac{[K^2(e_1^{-2} - e_2^{-2}) + D^2]^2}{4D} \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (11)$$

X^0 мм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	20,18 -0,09	20,21 -0,04	22,16 -0,09	23,27 +0,02	24,26 +0,01	25,25 0,00	26,20 -0,05	27,21 -0,04	28,30 +0,05	29,31 +0,06	30,28 +0,03
25	35,07 +0,10	36,15 +0,19	37,07 +0,12	38,00 +0,03	38,98 +0,01	39,97 0,00	40,89 -0,08	41,85 -0,12	42,78 -0,18	43,70 -0,27	44,82 -0,15
40	28,28 +0,18	29,17 +0,05	30,17 +0,05	31,09 -0,01	32,12 +0,02	33,10 0,00	33,90 -0,2	35,06 -0,04	36,03 -0,01	37,02 -0,08	38,04 -0,05

Примечание. X^0 — истинное значение перемещения острия указателя; η — угол наклона на оси указателя относительно нормали к поверхности планшета в плоскости, перпендикулярной матрице проводников; $\Delta x/X$ — измеренное значение перемещения острия указателя и абсолютная ошибка соответственно.

Решая систему (10), можно определить уравнение для искомой координаты X острия указателя:

$$X = \frac{KL [e_1' (D - x_{\Pi}) e_1^{-2} + e_2' x_{\Pi} e_2^{-2}] + Dx_{\Pi} z_{\Pi}}{z_{\Pi} D} \quad (12)$$

Совокупность уравнений (3), (9), (11), (12) позволяет, измерив величины $e_1', e_1'', e_1'''; e_2', e_2'', e_2'''; e_3', e_3'', e_3'''$, вычислять положение острия указателя вне зависимости от пространственной ориентации его оси.

В таблице приведены экспериментальные данные, подтверждающие перспективность описанного метода определения координат острия указателя.

Важным свойством метода является слабая зависимость от ряда дестабилизирующих факторов (низкочастотные электромагнитные помехи; изменения параметров тока, протекающего в шинах; краевой эффект и т. д.), обусловленная компенсационным подходом к вычислению X . Например, экспериментальное исследование точностных параметров метода при $D = 10$ мм, $r = 6 \div 10$ мм, $L = 45$ мм показало, что даже при девиации импульсов тока в 30% от номинала максимальная погрешность не превысила $\pm 0,35$ мм, а при девиации в $1 \div 2\%$ погрешность снизилась до $\pm 0,2$ мм.

Заключение. Обоснованная выше возможность реализации указателя типа «карандаш» и полученные экспериментальные данные свидетельствуют о перспективности описанного метода при построении электромагнитных КИС матричного типа. Слабая зависимость функционирования описанного указателя от пространственной ориентации в совокупности с реальной возможностью конструктивного решения делают его практически пригодным для внедрения в ряд известных электромагнитных КИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ньюмен У., Спрулл Р. Основы интерактивной графики. — М.: Мир, 1976.
2. Оперативные графические системы в автоматизации проектирования/Под ред. Н. А. Ярмоша. — Минск: Наука и техника, 1974.
3. Сакагути М., Ханаки С. Устройства ввода графической информации. — Дэнси цусин гаккайси, 1967, т. 60, № 6, с. 645—653.
4. Чеголин П. М., Леонович Э. Н., Савинков В. П. Автоматизация преобразования сложных форм графической информации. — Минск: Наука и техника, 1973.
5. Леонович Э. Н., Жевелев Б. Я. Анализ и расчет некоторых параметров электромагнитных графопостроителей. — В кн.: Автоматизация процессов проектирования. Минск: Ин-т техн. кибернетики АН БССР, 1980, вып. 3, с. 92—103.
6. Леонович Э. Н., Жевелев Б. Я. Принципы построения двухэлементного съемника координат полуавтоматических устройств графического ввода. — Там же, с. 104—110.