
УДК 62-50+007.52 : 621.318.2

Ю.М. Запорожец, канд. техн. наук
Ин-т возобновляемой энергетики НАН Украины
(Украина, 02094, Киев, ул. Червоногвардейская, 20 А,
тел. (044) 2062809, e-mail: umz-286@bigmir.net),

В.Ю. Кондратенко, аспирант
Колорадский университет Денвера
(США, CO 80217-3364, Denver,
e-mail: volodymyr.kondratenko@email.ucdenver.edu),

Ю.П. Кондратенко, д-р техн. наук
Черноморский государственный университет им. П. Могилы
(Украина, 54003, Николаев, ул. 68-ми Десантников, 10,
тел. (0512) 464074, e-mail: y_kondratenko@rambler.ru)

Особенности компьютерного моделирования составляющих магнитного поля вблизи полюсных граней и ребер магнитов многокоординаторного датчика проскальзывания

Выполнен анализ математической модели составляющих магнитного поля двухкоординатного устройства с магниточувствительными элементами для регистрации сигнала проскальзывания. Выявлены причины возникновения погрешностей вычислительных процедур. Разработаны алгоритмические приемы и математические методы предотвращения «машинных» ошибок. Получены новые по физическому содержанию выражения составляющих напряженности магнитного поля, позволяющие значительно уменьшить размерность математической модели и необходимый вычислительный ресурс.

Здійснено аналіз математичної моделі складових магнітного поля двухкоординатного пристрою з магніточутливими елементами для реєстрації сигналу проковзування. Виявлено причини виникнення помилок обчислювальних процедур. Розроблено алгоритмічні прийоми та математичні методи запобігання «машинних» помилок. Отримано нові за фізичним змістом вирази складових напруженості магнітного поля, які дозволяють значно зменшити розмірність математичної моделі та необхідний обчислювальний ресурс.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сигнал проскальзывания, математическая модель, магнитное поле, алгоритм, вычислительная процедура.

Совершенствование сенсорных систем роботов — определяющий фактор в обеспечении способности адаптивных роботов выполнять поставленные задачи. Для придания роботам адаптивных свойств используют датчики проскальзывания (ДП), обеспечивающие коррекцию сжимающего усилия

© Ю.М. Запорожец, В.Ю. Кондратенко, Ю.П. Кондратенко, 2013

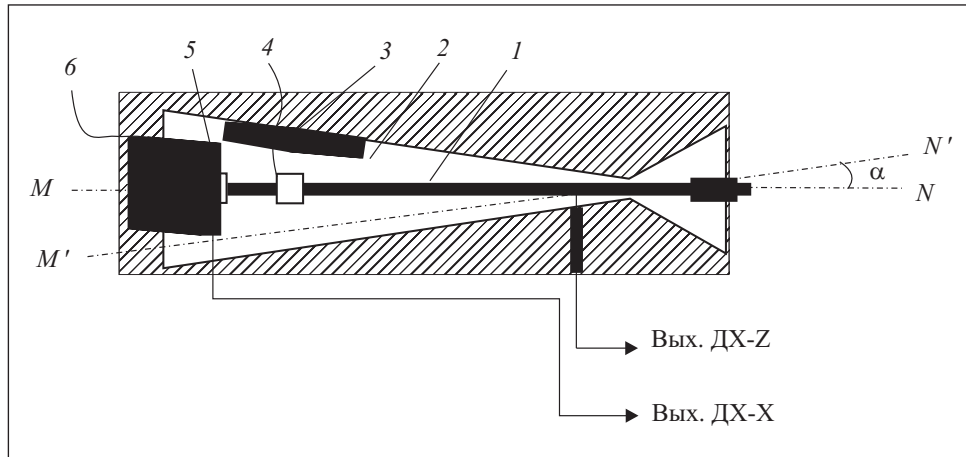


Рис. 1. Схема магниточувствительной системы ДП

захватного устройства при изменении (или неизвестной величине) массы объекта манипулирования. В современных сенсорных системах адаптивных роботов достаточно широко применяются ДП и датчики перемещения с магниточувствительными элементами на основе постоянных магнитов [1, 2]. Известные в настоящее время ДП в большинстве случаев пригодны для регистрации сигналов проскальзывания объектов в захватных устройствах адаптивных роботов лишь в одном направлении [1, 2], а именно в направлении силы тяжести, что существенно ограничивает область их практического применения.

Для расширения функциональных возможностей адаптивных роботов необходимо построение информационно-измерительных систем, способных регистрировать (в процессе манипулирования деталями) направление проскальзывания деталей при их столкновении с препятствиями. В частности, разработанное двухкоординатное устройство, позволяет расширить функциональные возможности ДП посредством регистрации проскальзывания не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости, т.е. в результате формирования сигналов проскальзывания и перемещения объектов, с которыми манипулируют адаптивные роботы, в трехмерном пространстве, что обеспечивает им свойства объемной чувствительности.

На рис. 1 представлена упрощенная схема двухкоординатного устройства с магниточувствительной системой для регистрации сигнала проскальзывания. Принцип действия двухкоординатного ДП состоит в измерении с помощью датчиков Холла (ДХ) 4, 5 изменения составляющих магнитной индукции B при их перемещении относительно полюсных граней магни-

тов 3, 6, имеющих форму призмы, которые установлены в конической полости 2 корпуса датчика.

Датчики Холла 4 и 5 закреплены на стержне 1. Его подпружиненный наконечник на свободном конце непосредственно контактирует с объектом манипулирования, который может проскальзывать в захватном устройстве робота при недостаточной величине сжимающего усилия. Стержень 1 упруго связан с корпусом датчика и имеет возможность самостоятельно возвращаться в начальное положение MN при исчезновении возмущающего воздействия, которое при проскальзывании детали меняет положение стержня. При проскальзывании детали (объекта) стержень отклоняется от оси MN в положение $M'N'$. При этом изменяется значение составляющей магнитной индукции, измеряемой соответствующим ДХ.

Датчик 4 измеряет продольную составляющую индукции B_z , параллельную направлению намагниченности магнита 3, и отдалается от полюсной грани магнита в перпендикулярном к ней направлении, вдоль оси z , фиксируя таким образом сигнал $B_z(z)$. Датчик 5 измеряет поперечную составляющую индукции B_x (или B_y) и перемещается параллельно полюсной грани магнита 6 вдоль оси x (или y).

Постановка задачи. Очевидно, что совершенствование сенсорной системы рассмотренного типа в значительной мере обусловлено адекватностью модели преобразования первичного воздействия в выходной сигнал, которая может быть положена в основу построения информационно-измерительной системы [3, 4]. Таким образом, алгоритм формирования выходного сигнала магниточувствительного элемента ДП для управления действиями адаптивного робота определяется математической моделью или математическими зависимостями составляющих магнитного поля, измеряемыми ДХ, от перемещения ДХ по соответствующей координате.

В работе [5] синтезирована математическая модель составляющих магнитного поля многокоординатной магниточувствительной системы ДП рассмотренного класса. В частности, для равномерно намагниченного призматического магнита, имеющего размеры поперечного сечения $c \times d$ и высоту l (или длину по направлению намагниченности J), z компонента магнитного поля, изменение которой соответствует проскальзыванию в направлении силы тяжести (для удобства параметры магнитного поля согласно соотношению $B = \mu_0 H$ представлены в терминах напряженности поля), в любой точке пространства $P(x, y, z)$ определяется формулой

$$H_z(P) = \frac{J}{4\pi} \sum_1^2 (\pm 1) \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+j} \times$$

$$\times \operatorname{arctg} \frac{\left[x_P + (-1)^i \frac{c}{2} \right] \left[y_P + (-1)^j \frac{d}{2} \right]}{\left[z_P \mp \frac{l}{2} \right] \sqrt{\left[x_P + (-1)^i \frac{c}{2} \right]^2 + \left[y_P + (-1)^j \frac{d}{2} \right]^2 + \left[z_P \mp \frac{l}{2} \right]^2}}, \quad (1)$$

где первая составляющая внешней суммы (со знаком «плюс») соответствует полю «северной» полюсной грани (N), для которой $z_M = z_N = l/2$, а вторая составляющая (со знаком «минус») — полю «южной» полюсной грани (S), для которой $z_M = z_S = -l/2$ (начало координат размещено в центре магнита).

Поперечные составляющие магнитного поля (относительно направления намагниченности) представим в следующем виде:

$$H_x(P) = \frac{J}{4\pi} \sum_1^2 (\mp 1) \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+j} \operatorname{Arsh} \frac{y_P + (-1)^j \frac{d}{2}}{\sqrt{\left[x_P + (-1)^i \frac{c}{2} \right]^2 + \left(z_P \mp \frac{l}{2} \right)^2}}, \quad (2)$$

$$H_y(P) = \frac{J}{4\pi} \sum_1^2 (\mp 1) \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+j} \operatorname{Arsh} \frac{x_P + (-1)^i \frac{c}{2}}{\sqrt{\left[y_P + (-1)^j \frac{d}{2} \right]^2 + \left(z_P \mp \frac{l}{2} \right)^2}}. \quad (3)$$

Формулы (1) — (3) достаточно просто трансформируются в вычислительные процедуры. Поэтому, зная величину намагниченности магнитов и их геометрические параметры, а также чувствительность ДХ (постоянную преобразования, мВ/мТл), можно заранее рассчитать статические характеристики ДП (мВ/мм) по каждой координате для дальнейшего их использования при решении задач управления адаптивным роботом. Вместе с тем, следует заметить, что при использовании формул (1)—(3) для расчетов значений магнитного поля на малых расстояниях ДХ от поверхности полюсной грани, особенно вблизи ее ребер, возникают определенные особенности, обусловленные спецификой машинной реализации вычислительных операций.

Указанные обстоятельства связаны с необходимостью обеспечения по возможности большей чувствительности ДП к перемещению деталей во время манипулирования (от 0,1 до 0,2 мм), для чего применяются сверхминиатюрные пленочные ДХ [6] с размерами активной зоны 100×100 мкм и толщиной 0,05 мм. При этом в случае нейтрального положения чувствительного элемента ДП (стержня l на рис. 1) оба ДХ будут находиться

почти непосредственно на полюсных гранях магнитов, т.е. практически на нулевом расстоянии от них, чему в формулах (1)—(3) соответствует значение

$$\zeta = z_p - \frac{l}{2} = 0. \quad (4)$$

При значительном отклонении стрелы по горизонтальной координате x_p или y_p смещение ДХ от ребра полюсной грани ξ составляет

$$\xi = x_p - \frac{c}{2} = 0, \quad \eta = y_p - \frac{d}{2} = 0. \quad (5)$$

Таким образом, оказывается вполне возможным появление в знаменателях дробей, стоящих под знаками функций в формулах (1)—(3), очень малых чисел, приближающихся к «машинному» нулю, что может привести к значительным погрешностям в расчетах по типу разрывов II-го рода. Поскольку у физической модели такие явления не наблюдаются (все составляющие поля снаружи магнита непрерывны), очевидно, что природа этих погрешностей является сугубо математической и устранить указанные сложности можно посредством надлежащих математических преобразований.

Исследуем методы трансформации соответствующих математических зависимостей и вычислительных процедур для обеспечения высокого уровня адекватности физических и математических моделей процессов регистрации сигналов проскальзывания с помощью многокоординатных магниточувствительных систем.

Прежде всего, рассмотрим проблему, связанную с возможностью появления нулевого множителя (4) в знаменателе формулы (1). В этом случае компьютер зафиксирует ошибку «деление на нуль» и результат останется неопределенным. Предотвратить данную ситуацию можно так. Учитывая ограниченность функции ($|\arctg \varphi| \leq \pi/2$), следует ввести в вычислительную процедуру условный оператор «if $|\zeta| \leq \varepsilon$ then $|\zeta| = k\varepsilon$ », где ε — машинный нуль, а k — произвольный коэффициент, $k = 5 \dots 10$. Тогда процессор рассчитает значение функции \arctg , которое для очень больших значений аргумента (обратных к нулю) практически не отличается от предельного значения $\pi/2$.

Значительно более сложная ситуация возникает при совпадении нулевых значений ζ (4) и ξ (5) в формуле (2) или ζ и η (5) в формуле (3), так как функция Arsh с увеличением аргумента возрастает неограниченно (подобно поведению функций в точках сингулярности). Более того, при условии $\zeta = 0$ «сингулярными» оказываются все точки на прямых $x_p = \pm c/2$ или $y_p = \pm d/2$, что абсолютно не отвечает физической картине поля вокруг

магнита, и в этом случае, безусловно, требуется соответствующая трансформация указанных выражений.

Получить формулы, более пригодные для реализации вычислительных процедур можно, предварительно воспользовавшись эквивалентной функции Arsh логарифмической формой [7], а именно: $\text{Arsh}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$. Тогда формула (2) преобразуется к виду

$$H_x(P) = \frac{J}{4\pi} \sum_1^2 (\mp 1) \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+j} \times \\ \times \ln \left\{ \left[y_P + (-1)^i \frac{d}{2} \right] + \sqrt{\left[x_P + (-1)^j \frac{c}{2} \right]^2 + \left[y_P + (-1)^i \frac{d}{2} \right]^2 + \left[z_P \mp \frac{l}{2} \right]^2} \right\}. \quad (6)$$

Однако и в виде (6) сохраняются условия появления вычислительных разрывов функций на линиях ребер (типа $\ln(0)$, но только с одной стороны ребра). Поэтому целесообразно осуществить дальнейшее преобразование выражения (6) с помощью соотношений Мольвейде [7]. Для этого из (6) возьмем пару слагаемых (без множителя $J/4\pi$) при фиксированном значении индекса j (например, $j = 2$), которые представляют элементарную составляющую поля и соответствуют конечным точкам одного ребра FG на рис. 2, ориентированного по оси y (при этом индекс i в (6) принимает значение $i = 1, 2$):

$$h_{x,j=2}^{(N)} = \ln \left[\left(y_P - \frac{d}{2} \right) + \sqrt{\left(x_P + \frac{c}{2} \right)^2 + \left(y_P - \frac{d}{2} \right)^2 + \left(z_P - \frac{l}{2} \right)^2} \right] - \\ - \ln \left[\left(y_P + \frac{d}{2} \right) + \sqrt{\left(x_P + \frac{c}{2} \right)^2 + \left(y_P + \frac{d}{2} \right)^2 + \left(z_P - \frac{l}{2} \right)^2} \right]. \quad (7)$$

На рис. 2 представлены все параметры формулы (7), в частности показана северная полюсная грань $FGMN$ и ее ближнее ребро FG , которое вместе с точкой наблюдения P , образуют треугольник FPG . Стороны этого треугольника определяются выражениями $FG = d$,

$$FP = r_1 = \sqrt{\left(x_P + \frac{c}{2} \right)^2 + \left(y_P + \frac{d}{2} \right)^2 + \left(z_P - \frac{l}{2} \right)^2},$$

$$GP = r_2 = \sqrt{\left(x_P + \frac{c}{2} \right)^2 + \left(y_P - \frac{d}{2} \right)^2 + \left(z_P - \frac{l}{2} \right)^2}.$$

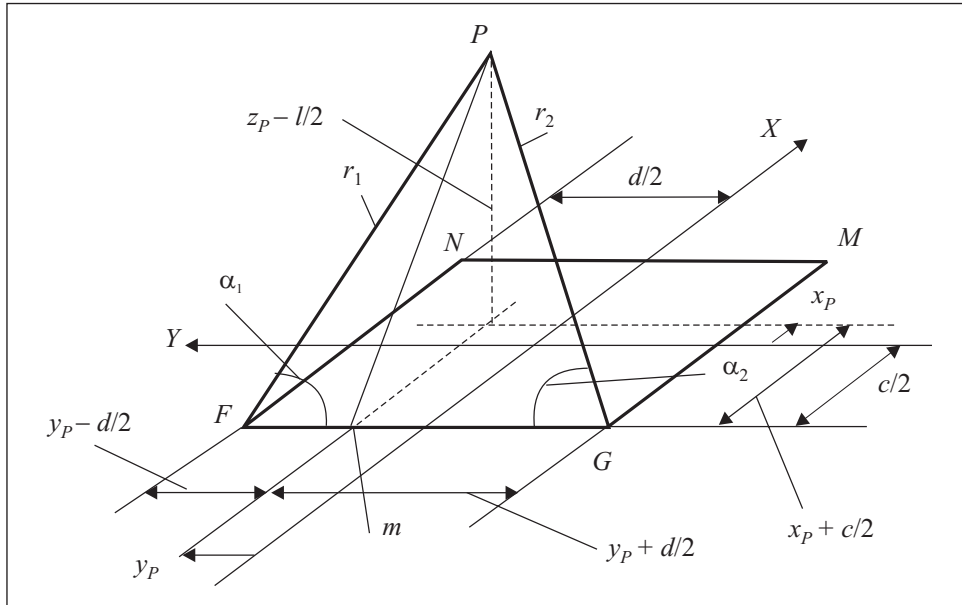


Рис. 2. Геометрическая структура модели (7)

Как видим, математически r_1 и r_2 являются радиус-векторами, проведенными из конечных точек ребра FG к точке наблюдения P . Тогда, обозначив

$$y_P - \frac{d}{2} = y_P^{(-)}, \quad y_P + \frac{d}{2} = y_P^{(+)}, \quad (8)$$

формулу (7) можно записать в виде

$$h_{x,j=2}^{(N)} = \ln \frac{r_1 + y_P^{(-)}}{r_2 + y_P^{(+)}}. \quad (9)$$

Аналогично определяются и радиус-векторы от конечных точек дальнего ребра MN :

$$NP = r_3 = \sqrt{\left(x_P - \frac{c}{2}\right)^2 + \left(y_P - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(z_P - \frac{l}{2}\right)^2},$$

$$MP = r_4 = \sqrt{\left(x_P - \frac{c}{2}\right)^2 + \left(y_P + \frac{d}{2}\right)^2 + \left(z_P - \frac{l}{2}\right)^2}.$$

Соответствующая составляющая поля может быть рассчитана так:

$$h_{x,j=1}^{(N)} = \ln \frac{r_3 + y_P^{(-)}}{r_4 + y_P^{(+)}}. \quad (10)$$

Далее, используя очевидные соотношения

$$-\frac{mF}{FP} = \frac{y_P^{(-)}}{r_1} = -\cos \alpha_1, \quad \frac{mG}{GP} = \frac{y_P^{(+)}}{r_2} = \cos \alpha_2,$$

теорему синусов и формулы Мольвейде, а также учитывая, что в (8) $y_P^{(-)} < 0$, осуществим преобразование формулы (9):

$$\begin{aligned} h_{x,j=2}^{(N)} &= \ln \frac{r_1 + y_P^{(-)}}{r_2 + y_P^{(+)}} = \ln \left(\frac{1 - \cos \alpha_1}{1 + \cos \alpha_2} \frac{r_1}{r_2} \right) = \ln \left(\frac{1 - \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1} \frac{\sin \alpha_2}{1 + \cos \alpha_2} \right) = \\ &= \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha_2}{2} \right) = \ln \left[\sqrt{\frac{(p-r_2)(p-d)}{p(p-r_1)}} \sqrt{\frac{(p-r_1)(p-d)}{p(p-r_2)}} \right] = \ln \frac{p-d}{p}, \end{aligned}$$

где $p = \frac{1}{2}(r_1 + r_2 + d)$ — полупериметр треугольника FPG . Окончательно находим

$$h_{x,j=2}^{(N)} = \ln \frac{r_1 + r_2 - d}{r_1 + r_2 + d}.$$

Аналогично получим

$$h_{x,j=1}^{(N)} = \ln \frac{r_3 + r_4 - d}{r_3 + r_4 + d}.$$

Таким образом, полное выражение для x составляющей поля от северного полюса магнита имеет вид

$$h_x^{(N)} = h_{x,j=2}^{(N)} - h_{x,j=1}^{(N)} = \ln \left(\frac{r_1 + r_2 - d}{r_1 + r_2 + d} \right) - \ln \left(\frac{r_3 + r_4 - d}{r_3 + r_4 + d} \right). \quad (11)$$

Повторив все выкладки для южной полюсной грани, получим

$$h_x^{(S)} = - \left[\ln \left(\frac{r'_1 + r'_2 - d}{r'_1 + r'_2 + d} \right) - \ln \left(\frac{r'_3 + r'_4 - d}{r'_3 + r'_4 + d} \right) \right], \quad (12)$$

где радиус-векторы со штрихами соответствуют векторам без штрихов при замене $(z_P - l/2)$ на $(z_P + l/2)$, т.е.

$$r'_1 = \sqrt{\left(x_P + \frac{c}{2}\right)^2 + \left(y_P + \frac{d}{2}\right)^2 + \left(z_P + \frac{l}{2}\right)^2}$$

и так далее. С учетом выражений (11) и (12) формула для расчета горизонтальной составляющей напряженности поля H_x принимает окончательный компактный вид:

$$H_x(P) = \frac{J_T}{4\pi} \left[\ln\left(\frac{r_1 + r_2 - d}{r_1 + r_2 + d}\right) - \ln\left(\frac{r_3 + r_4 - d}{r_3 + r_4 + d}\right) - \ln\left(\frac{r'_1 + r'_2 - d}{r'_1 + r'_2 + d}\right) + \ln\left(\frac{r'_3 + r'_4 - d}{r'_3 + r'_4 + d}\right) \right]. \quad (13)$$

Для расчета второй горизонтальной составляющей напряженности поля H_y в формуле (13) меняем переменную y_P и параметр d соответственно на x_P и c :

$$H_y(P) = \frac{J_T}{4\pi} \left[\ln\left(\frac{r_1 + r_3 - c}{r_1 + r_3 + c}\right) - \ln\left(\frac{r_2 + r_4 - c}{r_2 + r_4 + c}\right) - \ln\left(\frac{r'_1 + r'_3 - c}{r'_1 + r'_3 + c}\right) + \ln\left(\frac{r'_2 + r'_4 - c}{r'_2 + r'_4 + c}\right) \right]. \quad (14)$$

Результаты расчетов горизонтальных составляющих напряженности поля по формулам (2), (6) и (13), (14) полностью совпадают во всех точках пространства кроме точек, расположенных непосредственно на линиях продолжения ребер полюсных граней в обе стороны (ребра FG и MN). На этих линиях функции (2), (6) имеют вычислительный разрыв, однако функция (13) за пределами отрезка FG такого разрыва не претерпевает.

Вместе с тем, если точка наблюдения P точно попадает на указанные ребра, возникает неопределенность функции (13), но не вычислительного характера, а присущая математическим свойствам той физической модели, которую она отображает. Рассмотрим, что же представляет собой выражение (13), а именно каждое логарифмическое слагаемое в нем. Согласно решению полевой задачи, приведенному, например, в [8],

$$\varphi = -\frac{\tau}{4\pi} \ln\left(\frac{r_1 + r_2 - l}{r_1 + r_2 + l}\right),$$

где φ есть не что иное, как потенциал поля равномерно заряженной оси (или нити) конечной длины l с линейной плотностью заряда τ .

Таким образом, расчетная модель для вычисления x составляющей напряженности поля призматического магнита представляется в виде потенциала линейных зарядов, равномерно распределенных на ребрах полюсных граней магнита, перпендикулярных оси x (FG и MN), взятых с соответствующими знаками (для грани N — знак «плюс», для грани S — знак «минус»).

Для вычисления y составляющей поля применяется потенциал зарядов ребер, перпендикулярных оси y (GM и FN). Естественно, такой потенциал в точках заряженной оси по физической природе является расходящимся, как и потенциал точечного заряда в месте его нахождения.

Следует, однако, заметить, что вторая горизонтальная составляющая напряженности поля H_y в точках ребер, параллельных оси y и, соответственно, перпендикулярных оси x (как FG), остается непрерывной, как и составляющая H_x в точках ребер, параллельных оси x и перпендикулярных оси y (как GM).

Выполненные исследования подтверждены результатами расчетов пространственного распределения x компоненты поля $h_x^{(N)}(x, y)$ для магнита с размерами полюсной грани $c \times d = 20 \times 40$ мм и высотой $l = 10$ мм на различных расстояниях ζ от плоскости полюсной грани магнита. На рис. 3, а—г, представлены графики распределения $h_x^{(N)}(x, y)$ на малом ($\zeta = 0,5$ мм) и большом ($\zeta = 5$ мм) расстояниях от полюсной грани и графики распределения той же компоненты поля непосредственно в плоскости полюсной грани магнита ($\zeta = 0$, что соответствует $z_p = l/2$), рассчитанные по формулам (2) и (11). На рис. 3, в, четко виден «желоб» — разрыв не только непосредственно на линиях ребер, но и на их продолжениях в обе стороны. Штриховой линией выделена часть такого рельефа, за пределами ребер такого разрыва не наблюдается (рис. 3, г).

y, мм	$h_x^{(N)}(x, y)$ при x, мм				
	9,5	9,8	10	10,2	10,5
20	3,608876	4,538837	∞	4,556726	3,653608
24	1,045002	1,059129	1,066925	1,073414	1,080719
28	0,557501	0,56667	0,572357	0,577703	0,585086
32	0,340487	0,347157	0,351419	0,355534	0,361429
36	0,224039	0,228994	0,232202	0,235335	0,23989
40	0,155367	0,159102	0,161539	0,163934	0,167445

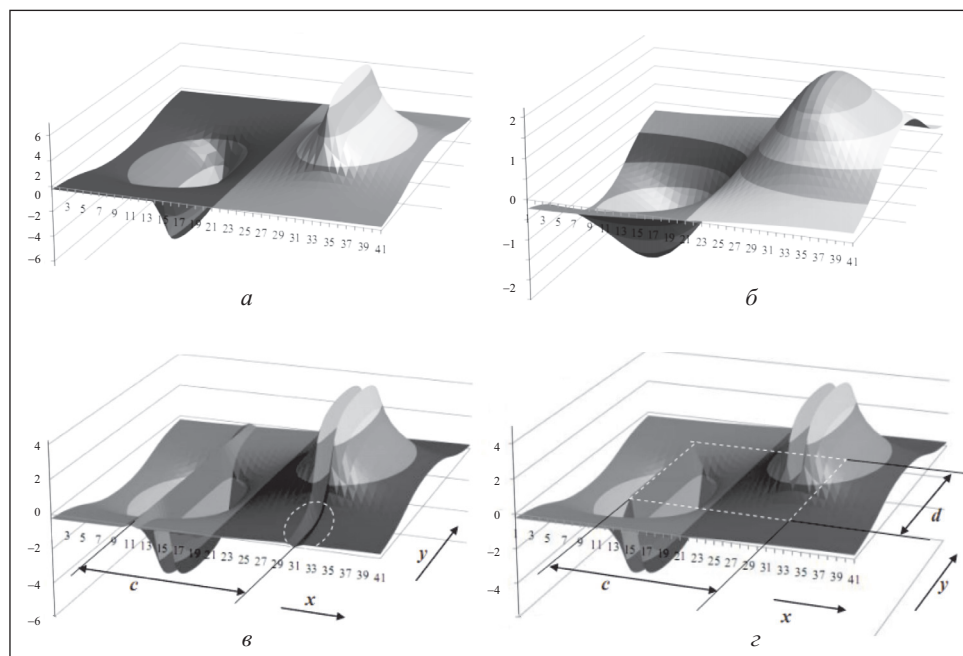


Рис. 3. Распределение горизонтальной компоненты поля $h_x^{(N)}(x, y)$ на различных расстояниях от полюса (*a*, *б*) и в плоскости полюсной грани (*в*, *г*): *a* — $\zeta = 0,5$ мм; *б* — $\zeta = 5$ мм; *в* — расчет по формуле (2); *г* — расчет по формуле (11)

В таблице приведены безразмерные (без множителя $J/4\pi$) численные значения $h_x^{(N)}(x, y)$ в выделенном штриховой линией диапазоне (см. рис. 3, *в*). Полученные результаты, рассчитанные по формулам (2) и (11), совпадают с точностью до 12-го знака, за исключением значений, полученных по формуле (11) для координаты $x = 10$ мм (на линии ребра GM). При этом в результате расчета по формуле (2) для всех значений координаты y происходит вычислительный разрыв.

Для построения систем управления адаптивных роботов с использованием предложенного двухкоординатного ДП исследованные варианты вычислительных процедур можно обобщить в виде алгоритма, блок-схема которого представлена на рис. 4.

При использовании математической модели, положенной в основу алгоритмов управления адаптивных роботов с магниточувствительными элементами ДП, возникают особые ситуации, в которых могут появиться погрешности, связанные со спецификой машинной реализации вычислительных процедур. Установлено, что в процессе расчетов составляющих магнитного поля «опасными» относительно возможности появления вычис-

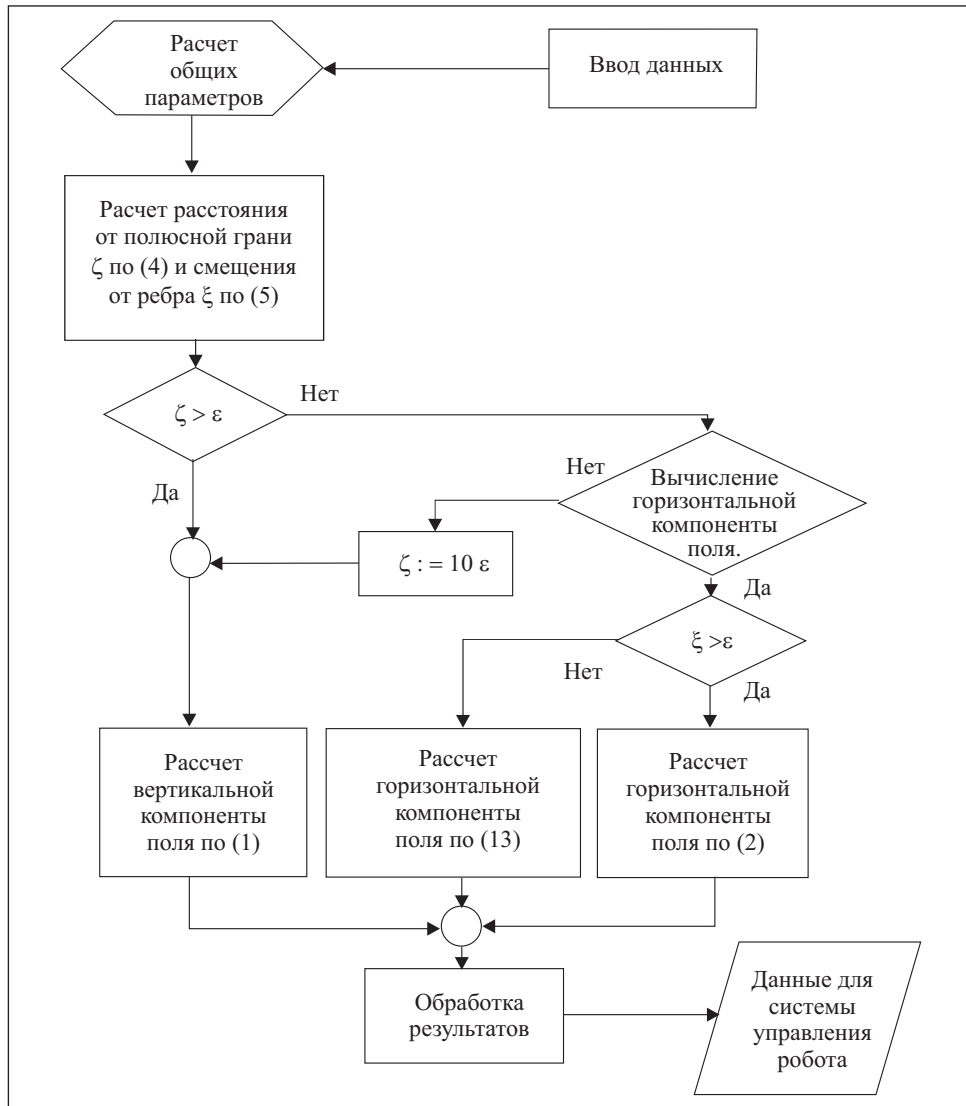


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчетов составляющих магнитного поля в двухкоординатном устройстве для регистрации сигнала проскальзывания

лительных разрывов (типа деления на нуль) являются зоны, находящиеся в плоскости полюсной грани магнита и особенно на линиях ее ребер.

Для предотвращения машинного прерывания вычислительного процесса при расчетах вертикальной составляющей поля по основной формуле (1) достаточно понизить порядок точности задания расстояния точки наблюдения от полюсной грани относительно машинного нуля без потери

точности конечного результата. В случае необходимости расчетов горизонтальных составляющих на линиях ребер магнита следует вместо основной формулы (2) применить полученную универсальную формулу (13). В общем случае формулу (13) можно использовать для расчетов поля во всем рабочем пространстве, но она является более громоздкой и менее экономной по затратам машинного времени.

Выводы

Полученная формула (13) раскрывает новое физическое содержание горизонтальных компонент напряженности поля: они оказались эквивалентными потенциалу определенного ансамбля зарядов, локализованных на геометрически упорядоченной системе нитей конечной длины. Таким образом, имитационную модель постоянного магнита, которую по обыкновению представляют в виде распределенных в его объеме магнитных диполей, удалось упростить до совокупности линейных магнитных зарядов. В результате размерность математической модели в рассмотренной задаче и соответственно необходимый вычислительный ресурс уменьшен фактически на два порядка.

The results of analysis of the mathematical model of the components of the magnetic field of a two-coordinate device with magnetic-sensing elements for registration of slip displacement signal are under consideration. This analysis shows that the errors of calculation procedures can appear in some special cases. Algorithmic techniques and mathematical approaches are suggested for preventing such kind of calculation errors. Some new content of the physical expressions for the components of the magnetic field are proposed by the authors. It will significantly reduce the dimension of the mathematical model and the required computational resource.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. — Москва : Техносфера, 2007. — 384 с.
2. Ueda M., Iwata K. Tactile Sensors for an Industrial Robot to Detect a Slip // Proc. of the Second International Symposium on Industrial Robots. — Chicago : IIT Research Institute, 1972. — II. — P. 63—76.
3. Kondratenko Y.P., Kondratenko V.Y., Shvets E.A., Shyshkin O.S. Adaptive Gripper Devices for Robotic Systems // Mechatronics and Robotics (M&R-2007): Proc. of Intern. Scientific-and-Techno-logical Congress (October 2—5, 2007). — Saint-Petersburg : Polytechnical University Press, 2008. — P. 99—105.
4. Kondratenko Y.P., Shvets E., Shyshkin O. Modern Sensor Systems of Intelligent Robots Based on the Slip Displacement Signal Detection // Annals of DAAAM for 2007 & Proc. of the 18th Int. DAAAM Symp. «Intelligent Manufacturing and Automation». — Vienna : Published by DAAAM International, 2007. — P. 381—382.
5. Запорожець Ю.М., Кондратенко Ю.П., Шишкін О.С. Математична модель датчика проковзування з реєстрацією поперечних складових магнітного поля чутливого елемента // Технічна електродинаміка. — 2012. — № 4. — С. 67 — 71.

6. Компания Diodes Incorporated начинает выпуск самых миниатюрных в мире датчиков Холла AH1892—<http://www.conektro.by/news/august2012/diodes-incorporated-ah1892.html>
7. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М. : Наука, 1981. — 720 с.
8. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. — М. : Энергия, 1968. — 458 с.

Поступила 19.12.12

ЗАПОРОЖЕЦ Юрий Михайлович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та возобновляемой энергетики НАН Украины. В 1973 г. окончил Николаевский кораблестроительный ин-т. Область научных исследований — энергетические комплексы и системы, преобразование видов энергии, автоматизация и моделирование процессов.

КОНДРАТЕНКО Владимир Юрьевич, аспирант Колорадского университета Денвера (США). В 2008 г. окончил Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, а в 2010 г. — Колорадский университет Денвера (США). Область научных исследований — моделирование нестационарных процессов и полей, алгоритмы и модели вычислительного интеллекта, компьютерные системы и информационные технологии, интеллектуальные датчики робототехнических систем.

КОНДРАТЕНКО Юрий Пантелеевич, д-р техн. наук, профессор кафедры интеллектуальных информационных систем Черноморского государственного университета им. Петра Могилы. В 1976 г. окончил Николаевский кораблестроительный ин-т. Область научных исследований — теория принятия решений, теория систем управления, теория нечетких множеств и нечеткая логика.