

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ УСТРОЙСТВ ИОННОЙ ОПТИКИ

**С.В. Колинко, А.Г. Пономарев**

*Институт прикладной физики НАН Украины,  
ул. Римского-Корсакова 3, г. Сумы, 4007  
e-mail:serg@ipflab.sumy.ua*

*Проанализированы методы исследования структуры полей устройств ионной оптики. Проведено моделирование влияния физических и геометрических факторов на точность метода восстановления структуры поля магнитных квадрупольных линз. Метод основан на измерении радиальной составляющей вектора индукции магнитного поля на виртуальной цилиндрической поверхности, охватывающей область прохождения пучка в рабочем зазоре линзы. Вычисление структуры поля внутри этой поверхности осуществляется на основании решения граничной задачи Неймана для уравнения Лапласа, где измеренные значения радиальной составляющей поля используются в качестве граничных условий. Это дает возможность определить пространственное распределение скалярного магнитного потенциала и вычислить мультипольные компоненты поля. Рассчитаны требования к параметрам установки для определения секступольных и октупольных компонент на минимальном уровне 0.1% от основной квадрупольной компоненты поля магнитной квадрупольной линзы.*

### ВВЕДЕНИЕ

Траектории движения заряженных частиц в устройствах ионной оптики (УИО) обуславливаются пространственным распределением их электрических и магнитных полей. Поэтому важной задачей является разработка методов исследования трехмерной структуры этих полей. Знание мультипольной 3D структуры полей УИО дает возможность проводить математическое моделирование нелинейной динамики пучка заряженных частиц как в отдельных элементах, так и системах УИО. Кроме того, такая информация важна для диагностики и усовершенствования существующих и разработки новых УИО.

Для фокусировки пучков заряженных частиц средних и высоких энергий в настоящее время наиболее эффективно применяются магнитные квадрупольные линзы (МКЛ), поэтому основное внимание в этой статье уделяется определению мультипольных компонент поля именно этих линз. Качество изготовления и юстировки МКЛ вносит определяющий вклад в параметры ионно-оптических систем. Так для сканирующего ядерного микронда минимальный размер пятна на мишени и, в итоге, предельная разрешающая способность, ограничиваются наличием паразитных компонент поля МКЛ. Таким образом задача анализа 3D структуры их поля сводится к нахождению мультипольных компонент поля в области прохождения пучка. Кроме того, физическая ось линзы, т.е. геометрическое место точек, в которых индукция магнитного поля равна нулю, может не совпадать с геометрической вследствие явления гистерезиса, следовательно, также необходимо знать пространственное положение физической оси.

### МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ 3D СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ

В настоящее время широко применяются в основном два метода диагностики поля МКЛ: теневой сеточный метод [1], и метод прямых измерений, при котором производится сканирование поля в рабочей области линзы измерительным преобразователем.

В тенево́м сеточном методе о структуре поля судят по его влиянию на траектории заряженных частиц, приводящему к искажению эталонного изображения при определенном угловом сдвиге между направлениями линий сетки и плоскостями симметрии МКЛ. Однако искаженное изображение дает скорее качественную информацию о наличии и порядке присутствующих мультипольных компонент. Для количественной же оценки применяется косвенный метод, заключающийся в подборе мультипольных компонент таким образом, чтобы при их подстановке в аналитическую модель, рассчитанное изображение максимально соответствовало экспериментальному. Очевидно, что точность этого метода определяется степенью достоверности аналитической модели и субъективной оценкой экспериментатора при сравнении изображений, поэтому не может быть высокой. Кроме того, практическая реализация метода достаточно трудоемка.

При методе прямых измерений либо сканируют рабочую область МКЛ вращающейся рамкой [2], либо производят точечные замеры индукции поля измерительным преобразователем, чаще всего датчиком Холла [3].

Метод вращающейся рамки позволяет выделить мультипольные компоненты, непосредственным анализом спектрального состава выходного сигнала напряжения методом разложения в ряд Фурье. К недостаткам этого метода следует отнести необходимость хорошей стабилизации скорости вращения рамки или сложную синхронизированную систему коррекции сигнала в зависимости от мгновенной скорости вращения рамки. Кроме того, неизбежно присутствуют механические биения оси вращения и вибрация рамки вносят некорректируемые погрешности в измерения. Так же из-за больших геометрических размеров рамки имеют место интегральные искажения измеряемой величины, а возможная несоосность рамки с МКЛ влечет появление дополнительной погрешности. Тем не менее, данный метод незаменим в тех случаях, когда применение более точных невозможно, например, при исследовании полей сверхпроводящих МКЛ [2], где полупроводниковые датчики индукции неприменимы в условиях сверхнизких температур.

Использование в качестве измерительного преобразователя датчиков Холла дает возможность проводить трехмерное картографирование поля УИО проведением точечных измерений величины магнитной индукции. Под точечными следует понимать измерения в объеме пространства пренебрежимо малом по сравнению с объемом исследуемого поля. В работе [3] описана установка для картографирования радиальной компоненты поля МКЛ в цилиндрической системе координат. Полученные данные аппроксимируются зависимостью в виде ряда Фурье методом наименьших квадратов, что дает информацию о величине мультипольных компонент поля МКЛ. Точность этого метода зависит от точности измерения индукции, точности позиционирования датчика и погрешности численной аппроксимации рядом Фурье. Очевидно, что возможная несоосность системы позиционирования датчика Холла с МКЛ существенно повлияет на достоверность результата. Большое количество точек измерения в объеме поля приводит к существенным затратам времени как в процессе измерения, так и при обработке результатов.

Известны методы исследования структуры поля, в основе которых лежат прецизионные измерения индукции магнитного поля в дискретных точках на некоторой поверхности с последующим использованием результатов этих измерений в качестве граничных условий для уравнения Лапласа для магнитного скалярного или векторного потенциала, которое описывает поле в рабочем зазоре УИО.

Так, в работе [4] разработана методика исследования структуры поля МКЛ, основанная на проведении измерений нормальной составляющей

вектора магнитной индукции в дискретных точках, принадлежащих цилиндрической поверхности, которая охватывает интересующую область пространства внутри рабочего зазора линзы. Полученные значения индукции используются как граничные условия в краевой задаче Неймана для уравнения Лапласа, численное решение которого для скалярного магнитного потенциала дает 3D картину поля внутри упомянутой поверхности. Затем вычисляется пространственное положение физической оси линзы и значения мультипольных компонент поля.

В работе [5] авторы описывают разработанный ими математический аппарат для расчета скалярного и векторного потенциала 3D поля как одного, так и комбинации из нескольких УИО. В качестве входных данных используются измеренные значения величины одной из компонент (в цилиндрической системе координат) вектора индукции поля в точках на поверхности внутри рабочего зазора УИО. Аналитические зависимости выведены для двух типов поверхностей - цилиндрической, сосной с УИО, и плоскости, которой принадлежит ось УИО. Для описания мультипольных компонент поля используется псевдодифференциальный оператор, выраженный функциями Бесселя. В работе отмечается, что при таком подходе относительная ошибка аппроксимации поля не превышает максимальной относительной ошибки входных данных.

Оба метода [4,5] похожи для варианта с цилиндрической поверхностью, который более удобен с точки зрения технологической простоты позиционирования датчика. Вариант с позиционированием датчика на плоскости приемлем далеко не для всех УИО, поскольку габариты датчика (рис.1) сравнимы с диаметром рабочего зазора УИО, что сильно ограничивает свободу перемещения датчика и количество доступных точек для измерения. Отметим так же, что при конструктивных особенностях существующих датчиков Холла, наибольший диаметр цилиндрической поверхности, на которой можно расположить активную область датчика внутри рабочего зазора УИО, возможен при такой ориентации датчика, при которой он будет измерять именно радиальную составляющую вектора индукции поля. Поскольку поверхность большего диаметра может содержать больше точек, точность метода так же возрастет, следовательно, вариант с измерением радиальной составляющей вектора индукции поля более предпочтителен.

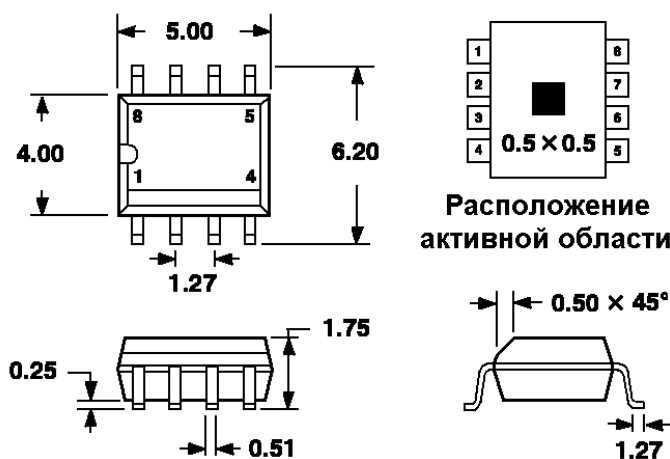


Рисунок 1 - Геометрические размеры (мм) и расположение активной области датчика Холла AD33151 [6]

Второй метод [5] предполагает соосность цилиндрической поверхности и УИО, достижение чего требует скрупулезной юстировки и технически сложен. Последствия несоосности авторами не анализируются.

В первом же методе [4] соосность измерительной системы и МКЛ при измерениях не требуется, положение оси рассчитывается и относительно него уже вычисляются мультипольные компоненты, поэтому технически он более прост для реализации. Приняв этот метод за базовый, далее анализируются требования к датчику Холла и точности его позиционирования для определения мультипольных компонент поля МКЛ.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МУЛЬТИПОЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ МКЛ

С учетом проведенного выше анализа, по совокупности критериев точности, производительности и возможности технической реализации наиболее предпочтителен метод, изложенный в работе [4]. В нем проводится измерение нормальной составляющей вектора магнитной индукции в дискретных точках, принадлежащих цилиндрической поверхности  $G$  внутри рабочего зазора линзы. Точки измерения индукции  $(z_j, \theta_i)$  лежат в узлах сетки, как показано на рис.2.

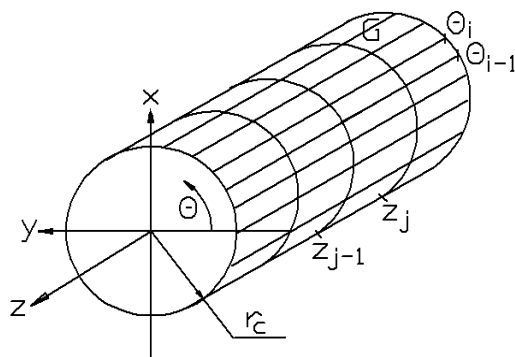


Рисунок 2 - Точки позиционирования датчика Холла на цилиндрической поверхности

Полученные значения индукции используются как граничные условия в краевой задаче Неймана для уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала

$$\Delta w(x, y, z) = 0, \quad -B_r(x, y, z) \Big|_{(x,y,z) \in G} = \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial n} \Big|_{(x,y,z) \in G}, \quad (1)$$

где  $w(x, y, z)$  – пространственное распределение скалярного магнитного потенциала в области прохождения пучка,  $B_r$  – измеренная радиальная составляющая магнитного поля в зазоре квадрупольной линзы на цилиндрической поверхности  $G$ ,  $n$  – внешняя нормаль к поверхности  $G$ .

Краевая задача (1) решается численно с применением метода граничных элементов в интегральном представлении пространственного распределения потенциала, что дает возможность определить 3D распределение поля внутри цилиндрической поверхности. Вычислением точек, в которых поле равно нулю, определяется положение физической

оси линзы. На этой оси вычисляется градиент поля, который определяет квадрупольную компоненту линзы и, соответственно, ее оптическую силу. Расчет производных высших порядков позволяет определить паразитные секступольную и октупольную компоненты поля МКЛ. Точность определения паразитных компонент зависит от точности измерения индукции поля, точности позиционирования датчика Холла и погрешности численных вычислений.

### ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКЦИИ ПОЛЯ

Точность измерения индукции поля зависит от физических параметров датчика Холла и интегральной погрешности связанной с размерами объема его активной области, что определяет локальность измерений. В настоящее время имеется широкий выбор коммерческих датчиков Холла. Так, например, сенсор магнитного поля AD33151 (рис.1) с линейным выходом и размерами зоны чувствительности  $0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,1$  мм<sup>3</sup> имеет относительную точность измерения индукции не хуже  $10^{-3}$ .

Так как активная область датчика имеет конечные размеры, то при проведении измерений в неоднородном поле результат измерения будет интегральной величиной:

$$\hat{B}_r(r, \alpha) \approx \frac{1}{4b \cdot t} \int_{(r-b)(\alpha-t)}^{(r+b)(\alpha+t)} \int B_r(\mu, \tau) d\tau d\mu, \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние до центра вращения датчика,  $b, d$  – геометрические размеры активной области датчика, приведенные на рис.3.

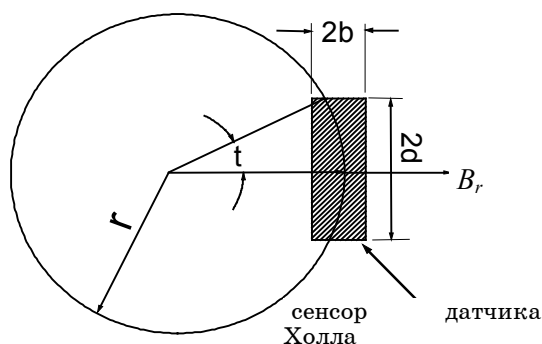


Рисунок 3 - Расположение активной области датчика Холла относительно центра вращения

На рис.4 приведена рассчитанная зависимость относительной погрешности измерения индукции  $\delta B(r) = |\hat{B}(r) - B(r)| / \hat{B}(r)$ , вносимой интегральными свойствами датчика в зависимости от расстояния до центра вращения для датчика Холла AD33151. От угла  $\alpha$  относительная погрешность зависит слабо.

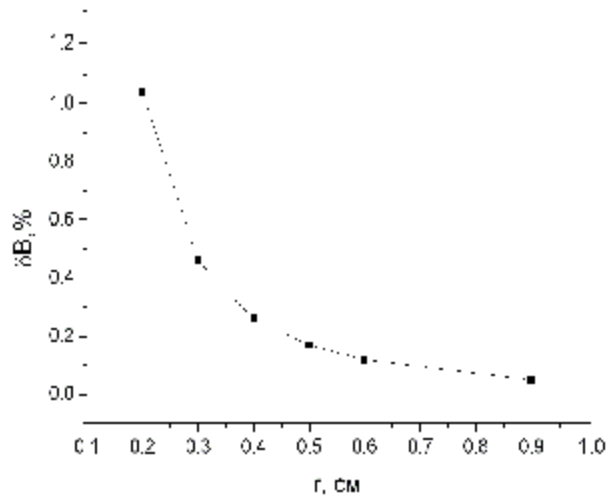


Рисунок 4 - Влияние расстояния до центра вращения на относительную погрешность измерения магнитной индукции датчиком Холла

### ПОГРЕШНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДАТЧИКА

Для оценки погрешности, связанной с неточностью позиционирования датчика Холла в пространстве, проведено численное моделирование, суть которого в следующем. Структура магнитного поля была задана аналитически в виде зависимости скалярного магнитного потенциала в цилиндрической системе координат:

$$w(r, \alpha, z) = W_2(z) \cdot r^2 \sin(2\alpha) + U_3(z) \cdot r^3 \cos(3\alpha) + W_3(z) \cdot r^3 \sin(3\alpha) + U_4(z) \cdot r^4 \cos(4\alpha) + W_4(z) \cdot r^4 \sin(4\alpha) \quad (3)$$

где  $W_2(z)$  – продольное распределение основной квадрупольной компоненты,  $W_3(z), U_3(z)$ ;  $W_4(z), U_4(z)$  – продольное распределение основной и вращательной секступольных и октупольных паразитных компонент поля соответственно. Параметры структуры поля выбраны соответствующими по своему порядку типовым параметрам квадрупольной линзы:  $W_3(0)/W_2(0) = 0,002$  [1/см],  $U_3(0)/W_2(0) = 0,004$  [1/см],  $W_4(0)/W_2(0) = 0,006$  [1/см<sup>2</sup>],  $U_4(0)/W_2(0) = 0,008$  [1/см<sup>2</sup>]. Радиальная составляющая имеет аналитическую зависимость  $B_r = -\partial w / \partial r$ .

Затем в соотношение (2) подставлялись дискретные значения  $(\hat{r}_i = r_i + \Delta r_i, \hat{\alpha}_j = \alpha_j + \Delta \alpha_j)$  и вычислялись значения  $B_r(\hat{r}_i, \hat{\alpha}_j, z)$ . Здесь  $\Delta r_i$  и  $\Delta \alpha_j$  – величины, получаемые с помощью генератора случайных чисел и моделирующие неточность радиального и углового позиционирования соответственно в пределах от нуля до задаваемого максимального значения  $\Delta r$  и  $\Delta \alpha$ . Полученные таким образом значения индукции  $B_r(\hat{r}_i, \hat{\alpha}_j, z)$ , в которых заложена погрешность позиционирования, использованы для расчета мультипольных компонент с применением описанного метода восстановления структуры поля для двумерной геометрии (при  $z = \text{const}$ ).

Сравнение аналитически заданных и вычисленных мультипольных компонент позволяет найти относительную погрешность метода. На рис.5

и рис.6 соответственно приведены зависимости относительной погрешности от угловой и радиальной неточности позиционирования.

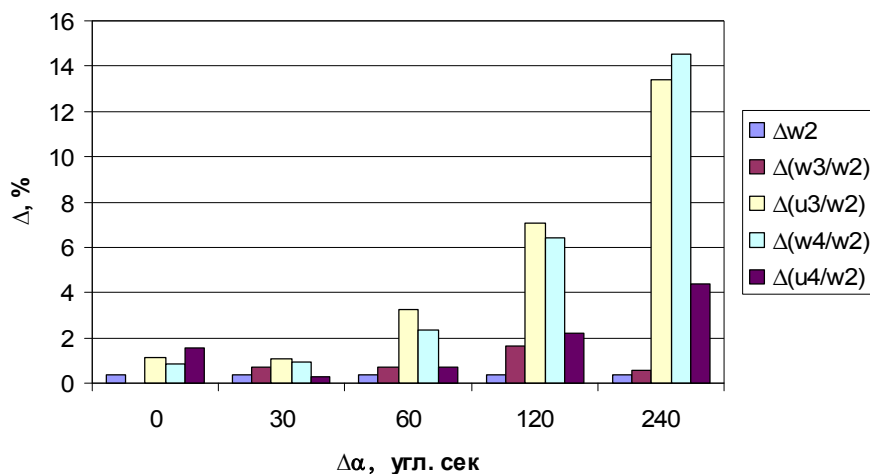


Рисунок 5 - Зависимость относительной погрешности определения мультипольных компонент от угловой неточности позиционирования  $\Delta\alpha$

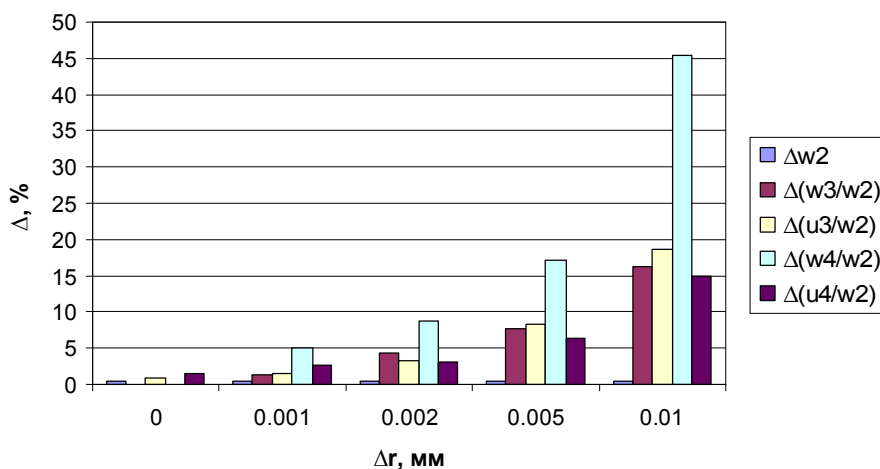


Рисунок 6 - Зависимость относительной погрешности определения мультипольных компонент от радиальной неточности позиционирования  $\Delta r$

Следует отметить, что приведенные диаграммы отражают суммарную погрешность, состоящую из погрешности, обусловленной неточностью позиционирования и погрешности численного метода. Погрешность численного метода в чистом виде видна на диаграммах при нулевой неточности позиционирования.

Из диаграмм видно, что наиболее критичны требования к радиальной точности позиционирования, так как она зависит от суммы всех возможных люфтов механизма позиционирования датчика Холла. Погрешность до 50% в определении октупольных паразитных компонент можно считать удовлетворительной, поскольку вклад этой компоненты в поле не превышает 1%. Таким образом, радиальную точность

позиционирования менее 0,01 мм следует считать приемлемой. Достижение такой точности возможно с применением линейных модулей перемещения с шариковыми направляющими.

## ВЫВОДЫ

Проанализированы методы исследования структуры поля устройств ионной оптики. По совокупности критериев точности, производительности и простоты технической реализации наиболее предпочтителен метод, основанный на измерении радиальной составляющей вектора индукции магнитного поля на виртуальной цилиндрической поверхности и использовании данных измерения в качестве граничных условий краевой задачи Неймана для уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала. Решение такой краевой задачи позволяет определить пространственное распределение поля в рабочем зазоре магнитных устройств ионной оптики.

Проведено численное моделирование влияния размеров датчика Холла и точности его позиционирования на погрешность измерения индукции и погрешность вычисления мультипольных компонент поля МКЛ по этому методу. На основании расчетов сформулированы технические требования к параметрам установки определения секступольных и октупольных компонент на минимальном уровне 0,1% от основной квадрупольной компоненты поля МКЛ. Необходимая точность позиционирования датчика Холла составила: радиальная <0,01 мм, угловая <3'.

## SUMMARY

### THE PERFORMANCES SIMULATION OF FACILITY FOR FIELD STRUCTURE INVESTIGATION IN ION OPTICS DEVICES

**Kolinko S.V., Ponomarev A.G.**

*Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine  
e-mail:serg@ipflab.sumy.ua*

*The analysis techniques of the field structure in ion optical devices were analysed. The technique based on measurement of a radial component of magnetic induction vector on the virtual cylindrical surface (and subsequent utilization of measured data as boundary condition for the Laplace equation for magnetic scalar potential) was chosen as the most preferable. The influence of Hall probe dimensions and accuracy of its positioning on measurement of induction value and calculation errors of multipole field components for magnetic quadrupole lenses was assigned by means of computer simulation. Required accuracy of Hall probe stage was estimated: radial <0.01 mm, angular < 3'.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. N. Jamieson, G. J. F. Legge. Aberrations of single magnetic quadrupole lenses // Nucl. Instr. and Meth. – 1987. – В. 29. – P. 544-556.
2. G. Datzmann, G. Dollinger, G. Hinderer, H.-J. Korner. A superconducting multipole lens for focusing high energy ions // Nucl. Instr. and Meth. – 1999. – В. 158. – P. 74-80.
3. G. R. Moloney, D. N. Jamieson, G. J. F. Legge. Measurement, analysis and modification of the fifth-order fringe field components of magnetic quadrupole lenses // Nucl. Instr. and Meth. – 1991. – В. 54. – P. 24-27.
4. Lebed S., Ponomarev A. Field reconstruction technique for testing magnetic quadrupole lens // Nucl. Instr. and Meth. – 1997. – В. 130. – P. 90-94.
5. R.M.G.M. Trines, S. J. L. van Eindhoven, J. I. M. Botman et al., Modelling the fields of magneto-optical devices, including fringe field effects and higher order multipole contributions, with application to charged particle optics // Phys. Rev. – 2001. -Vol. 4. – P. 062401.
6. [http://www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/AD22151.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD22151.pdf).

**Колынько С.В.**, инженер;

**Пономарев А.Г.**, кандидат физ.- мат. наук,  
ведущий научный сотрудник

*Поступила в редакцию 16 февраля 2008 г.*