

УДК 621.385.833.2

© А. О. Голубок, О. М. Горбенко, В. В. Котов,
И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын**ОБ АЛГОРИТМЕ СКАНИРОВАНИЯ В СКАНИРУЮЩИХ
ЗОНДОВЫХ МИКРОСКОПАХ С ОПТИЧЕСКИМИ
ЭНКОДЕРАМИ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

В работе предложен алгоритм, улучшающий пространственное разрешение сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ), оснащенных серийными оптическими датчиками линейных перемещений. Результаты работы алгоритма демонстрируются на СЗМ-изображениях тестовых объектов.

Кл. сл.: сканирующая зондовая микроскопия, оптические датчики линейных перемещений, микросканер, пространственное разрешение

ВВЕДЕНИЕ

В прецизионных электромеханических системах сканирования (микросканерах) современных сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) обычно используются пьезокерамические материалы, которые, как известно, характеризуются гистерезисом и нелинейностью зависимости механического смещения от управляющего электрического напряжения. Искажают движение микросканеров также термодрейф, люфты, механическая усталость, взаимовлияние осей, имеющие место в реальных механических конструкциях. Для устранения искажений, возникающих на СЗМ-изображениях вследствие перечисленных выше факторов, информацию о механическом смещении сканера извлекают не из управляющего электрического напряжения, а из показаний датчиков линейных перемещений, включенных в конструкцию сканера. В работе [1] для этих целей используются, например, оптические энкодеры (оптические датчики линейных перемещений) с указанным в паспорте шагом измерения 100 нм [2]. Поскольку коэффициент редукции перемещения для сканера, описанного в [1], равнялся 2.4, то минимальное измеряемое с помощью энкодера перемещение столика в плоскости (X,Y) составляло 240 нм и СЗМ-изображения строились с соответствующим минимальным шагом. Вообще говоря, пространственное разрешение СЗМ определяется характерным размером его зонда и может быть значительно лучше, поэтому представляется важным иметь возможность уменьшить минимальный шаг на СЗМ-изображении, сохранив метрологическую достоверность измерения. Конечно, эту задачу можно решить, выбрав оптический энкодер с меньшим шагом измерения. Однако при этом мо-

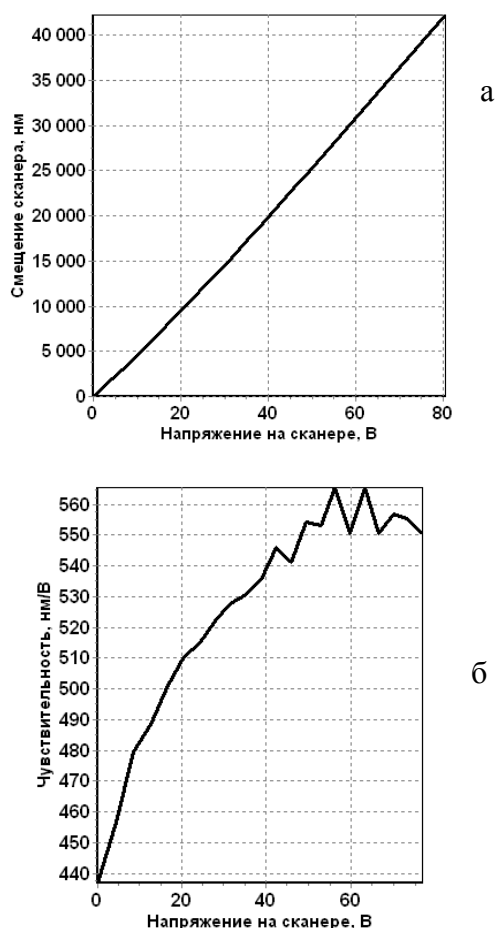


Рис. 1. Зависимости смещения сканера (а) и его чувствительности (б) от приложенного напряжения

гут возникнуть проблемы, связанные с конструктивной совместимостью датчиков и сканера, например, в связи с более жесткими требованиями к конструкции (с точки зрения защиты от вибраций), которая должна обеспечить не только функционирование датчиков, но и их настройку и юстировку. Целью данных исследований было уменьшение минимального метрологически достоверного шага на СЗМ-изображениях, полученных с использованием оптических энкодеров, применяемых в [1].

Как известно [1], чувствительность сканера определяется как коэффициент пропорциональности α в зависимости $L = \alpha U$, где L — механическое перемещение сканера, U — управляющее напряжение на сканере. Экспериментальная зависимость смещения сканера от управляющего напряжения приведена на рис. 1, а. Вообще говоря, эта зависимость имеет нелинейный характер, что видно из кривой чувствительности сканера от напряжения $\alpha(U)$, представленной на рис. 1, б. Однако при малых смещениях $\Delta L = 240$ нм, соответствующих минимальным шагам отсчета оптических энкодеров, зависимость $L = \alpha U$ можно считать линейной с постоянной чувствительностью α , соответствующей данному диапазону смещений.

Тогда между ближайшими отсчетами энкодера можно организовать микрошаги одинаковой длины, а информацию о рельефе поверхности снимать не только в момент срабатывания энкодера, но и на каждом микрошаге. За длину такого микрошага имеет смысл выбрать длину, соответствующую точности, с которой производит отсчеты используемый оптический энкодер линейных перемещений.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СЗМ-СКАНЕРА С ОПТИЧЕСКИМ ЭНКОДЕРОМ

Оценка точности измерений оптических энкодеров, работающих совместно со сканером СЗМ, осуществлялась следующим образом. Производилось многократное сканирование вдоль одной оси, как описано в [1]. Затем определялось количество дискрет напряжения, посылаемых в ЦАП между двумя последовательно полученными от оптического датчика сигналами, отмечающими факт регистрации датчиком минимального смещения в 240 нм. При этом принималось во внимание, что шумы ЦАП и шумы усилителя, управляющего смещением сканера, приводят к ошибке в смещении сканера, меньшей чем ошибка, обусловленная точностью измерения датчика. При этом мы полагали, что возникающий при многократных измерениях разброс в количестве дискрет управляющего напряжения, лежащих между соседними отсчетами энкодера, обусловлен дрейфами в конструкции сканера, совмещенного с оптическим датчиком перемещений, шумами в электронном тракте самого датчика и т. п. На рис. 2 приведен пример нормированной гистограммы распределения количества дискрет ЦАП, соответствующих факту регистрации датчиком минимального смещения. Гистограмма построена для 100 измерений.

Из представленной на рис. 2 гистограммы следует, что факту регистрации минимального смещения соответствует управляющее напряжение в 58 дискрет ЦАП со стандартным отклонением около 3 дискрет ЦАП. Это означает, что относительная

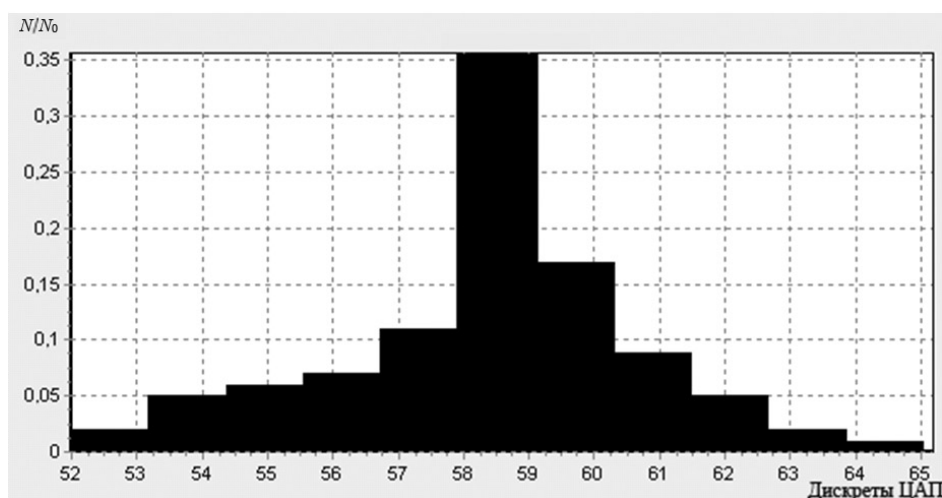


Рис. 2. Нормированная гистограмма распределения количества дискрет ЦАП, соответствующих факту регистрации датчиком минимального смещения при многократном сканировании вдоль одной оси

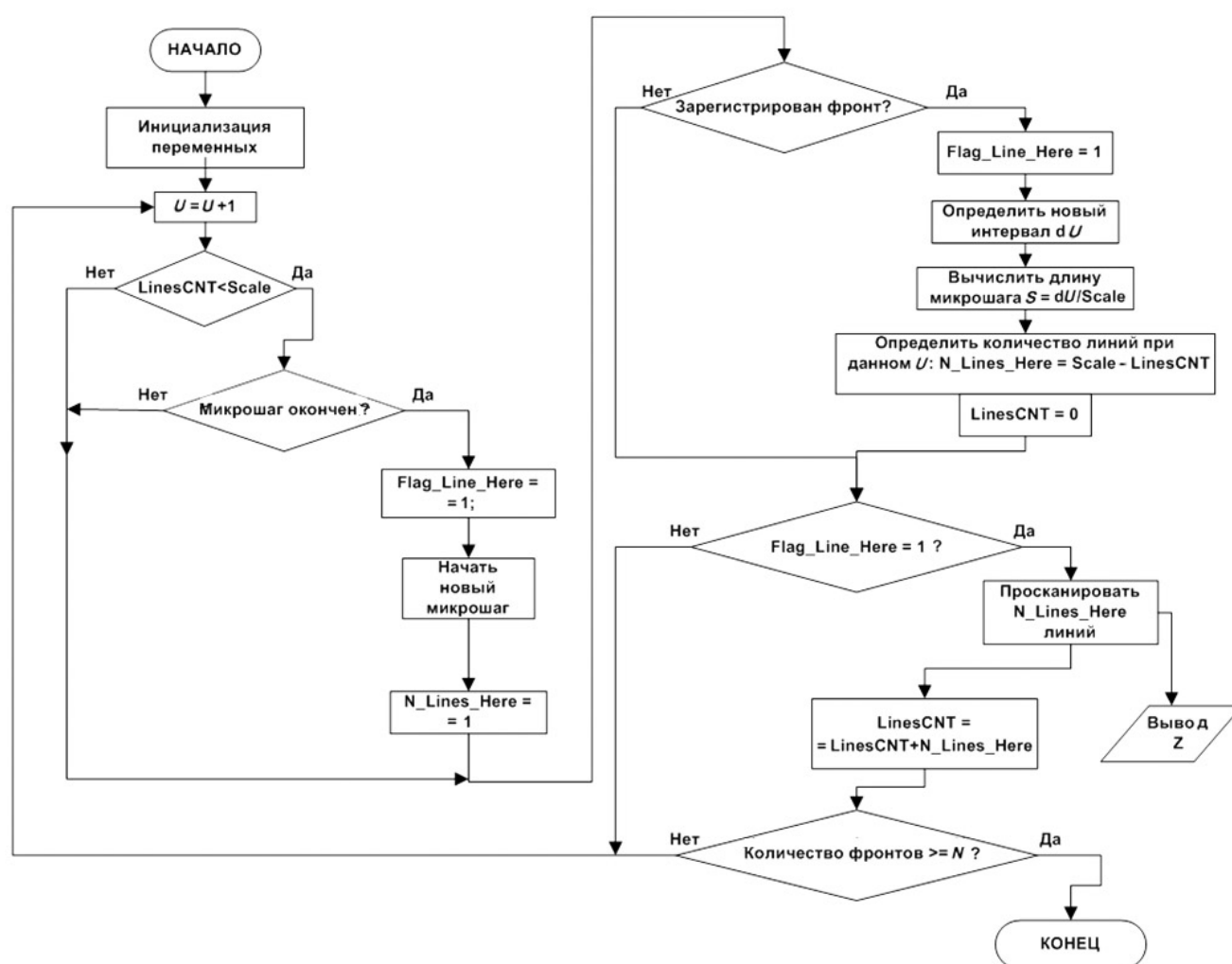


Рис. 3. Блок-схема алгоритма сканирования с микрошагами

ошибка датчика при измерении минимального смещения составляет приблизительно 10 %. Отсюда получаем, что минимальное измеряемое перемещение столика в плоскости (X,Y) в исследуемом сканере с оптическим энкодером составляет 240 нм с точностью измерения перемещения 24 нм.

АЛГОРИТМ СКАНИРОВАНИЯ С МИКРОШАГАМИ

Мы исследовали алгоритм сканирования с минимальным шагом, определяемым точностью отсчета оптических энкодеров линейных перемещений. Для этого каждый интервал управляющего напряжения между отсчетами датчиков делился условно на 10 равных частей. Принимая во внимание линейность перемещения при малых смещениях, можно считать, что каждому микрошагу со-

ответствовало смещение на ~ 24 нм. Вообще говоря, в силу нелинейности сканера величина микрошага в единицах дискрет ЦАП может быть различной между двумя соседними отсчетами датчика. В связи с этим для вычисления текущей величины микрошага в единицах дискрет ЦАП управляющего напряжения алгоритм управления использует предшествующую информацию о количестве дискрет, выставленных ЦАП между предыдущими отсчетами энкодера. На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма сканирования с микрошагами. На этой схеме подробно представлен алгоритм расчета величин микрошагов вдоль медленной оси сканирования, определяющих расстояния между линиями сканирования. Движение вдоль линии происходит при помощи выполнения аналогичного алгоритма, при этом вместо блока, озаглавленного на схеме (рис. 3) "Просканировать N_Lines_Here линий", должен располагаться блок

выполнения измерений. На рис. 4 представлено СЗМ-изображение поверхности тестового образца,

полученное с использованием описанного выше алгоритма сканирования с микрошагами.

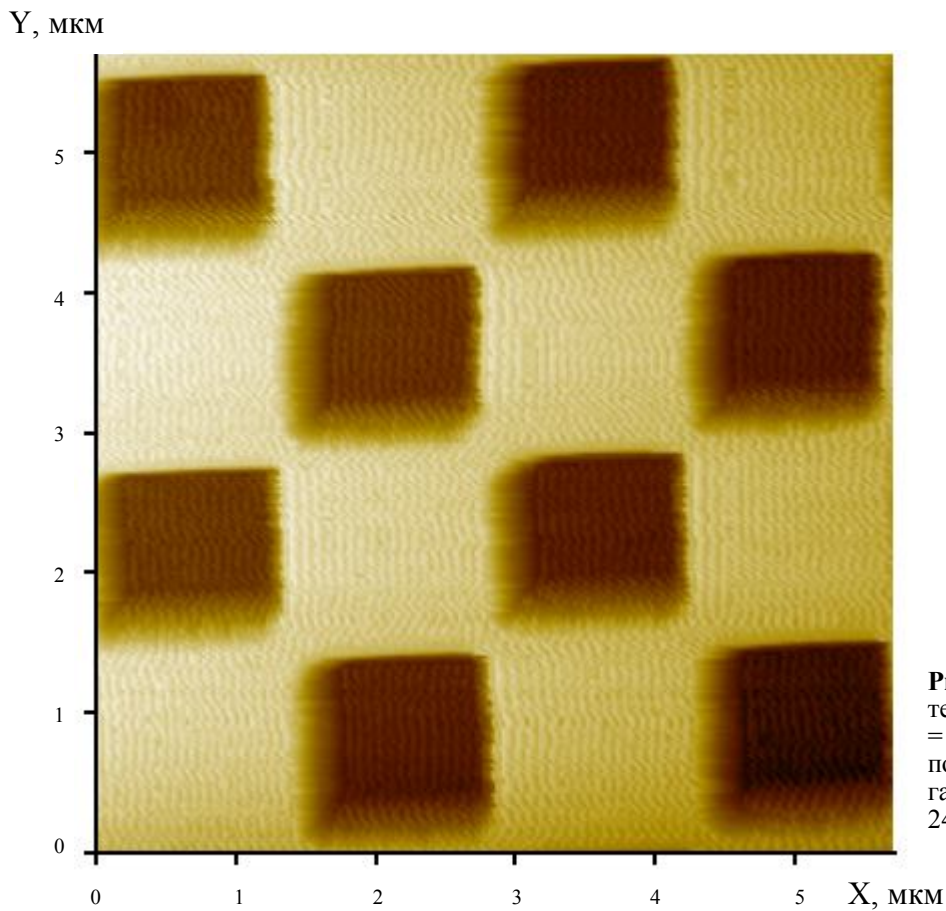


Рис. 4. Изображение двумерной тестовой решетки с периодом $d = 3$ мкм. Энкодеры включены. Используется алгоритм с микрошагами. Микрошаг сканирования 24 нм

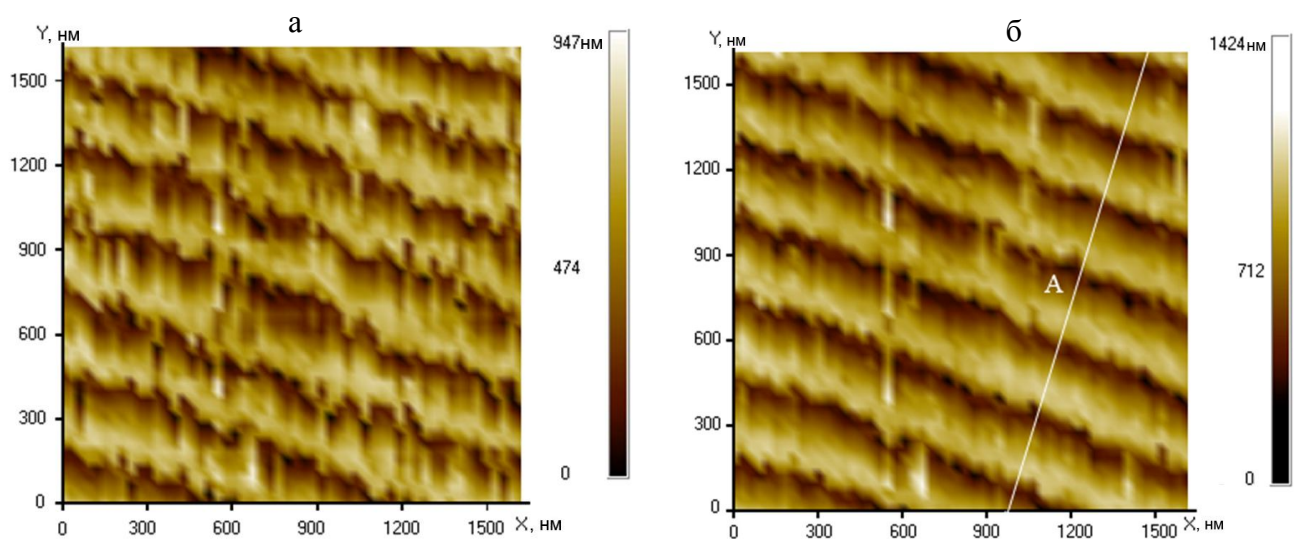


Рис. 5. СЗМ-изображения тестовой решетки с периодом $d = 268$ нм.

а — исходное изображение; б — результат применения алгоритма коррекции изображения

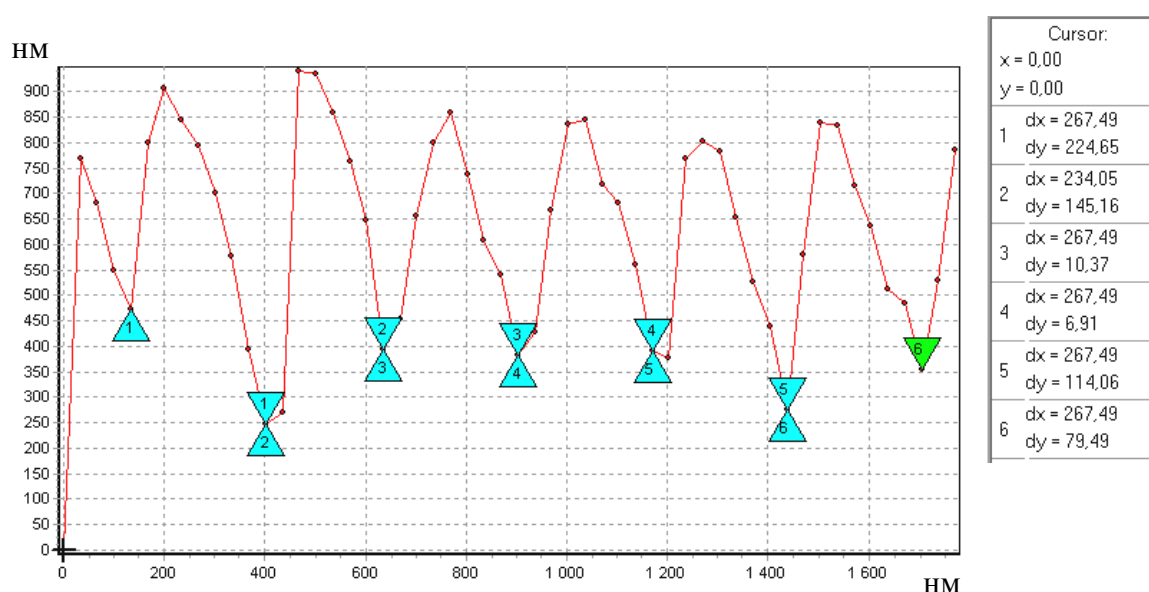


Рис. 6. Сечение А изображения, представленного на рис. 5, б

Здесь каждый интервал напряжения на сканере между отсчетами датчиков разделен на 10 равных частей, при этом шаг сканирования составляет 24 нм. На рис. 5 работа алгоритма демонстрируется на примере СЗМ-изображения одномерной тестовой решетки с более мелким периодом $d = 268$ нм. Следует отметить, что при использовании обычного алгоритма, представленного в работе [1], с шагом 240 нм получить изображение этого объекта невозможно. На рис. 5, а, на СЗМ-изображении тестовой решетки видны искажения, обусловленные тем, что определение величины микрошага в дискретах осуществляется с использованием данных, полученных на предыдущем измерении. Подобные искажения можно уменьшить путем обработки номограмм сканера [1], измеренных в процессе получения СЗМ-изображения. В основе метода коррекции СЗМ-изображения лежит сглаживание номограммы в латеральной плоскости. Описание алгоритма коррекции приведено в следующем разделе. Результат применения алгоритма коррекции изображения представлен на рис. 5, б.

Пространственный период, измеренный из поперечных сечений полученного СЗМ-изображения (рис. 6), имеет величину 262 ± 5 нм, что хорошо согласуется с паспортными данными тестового объекта.

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ СКАНИРОВАНИИ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ ЭНКОДЕРОВ

Рассмотрим работу алгоритма коррекции иска-

жений изображений на примере изображения тестовой решетки с периодом $d = 268$ нм (рис. 5, а). Это изображение получено путем сканирования вдоль оси Y. При сканировании с помощью оптических энкодеров производится сохранение не только данных выполняемых измерений, но также массивов координат точек, в которых проводились эти измерения. Координатами точек в этом случае служат величины напряжений на сканере, выраженные в дискретах ЦАП. По данным нормированных координат точек измерений построена номограмма рис. 7, а. Важно отметить, что для построения номограммы были выбраны значения координат только тех точек, которые соответствуют регистрации фронта импульса сигнала оптического энкодера (узловых точек), хотя измерения проводились с более мелким шагом. Для коррекции искажений проводится сглаживание массивов координат узловых точек. Для сглаживания используется алгоритм вычисления среднего значения по окрестности. Номограмма массивов координат узловых точек в единицах дискретных отсчетов ЦАП после сглаживания приведена на рис. 7, б. Для вычисления скорректированных координат всех точек измерений в единицах расстояния (нм) используется метод построения сплайнов. Сплайны строятся для функции расстояния, пройденного сканером в нм (расстояние, которое проходит сканер за время от записи одной узловой точки до следующей, известно), от напряжения на сканере; при этом напряжение на сканере задается элементами сглаженных массивов координат узловых точек. Значения сплайнов вычисляются для координат всех точек, в которых выполнялись измерения. Таким образом, получен

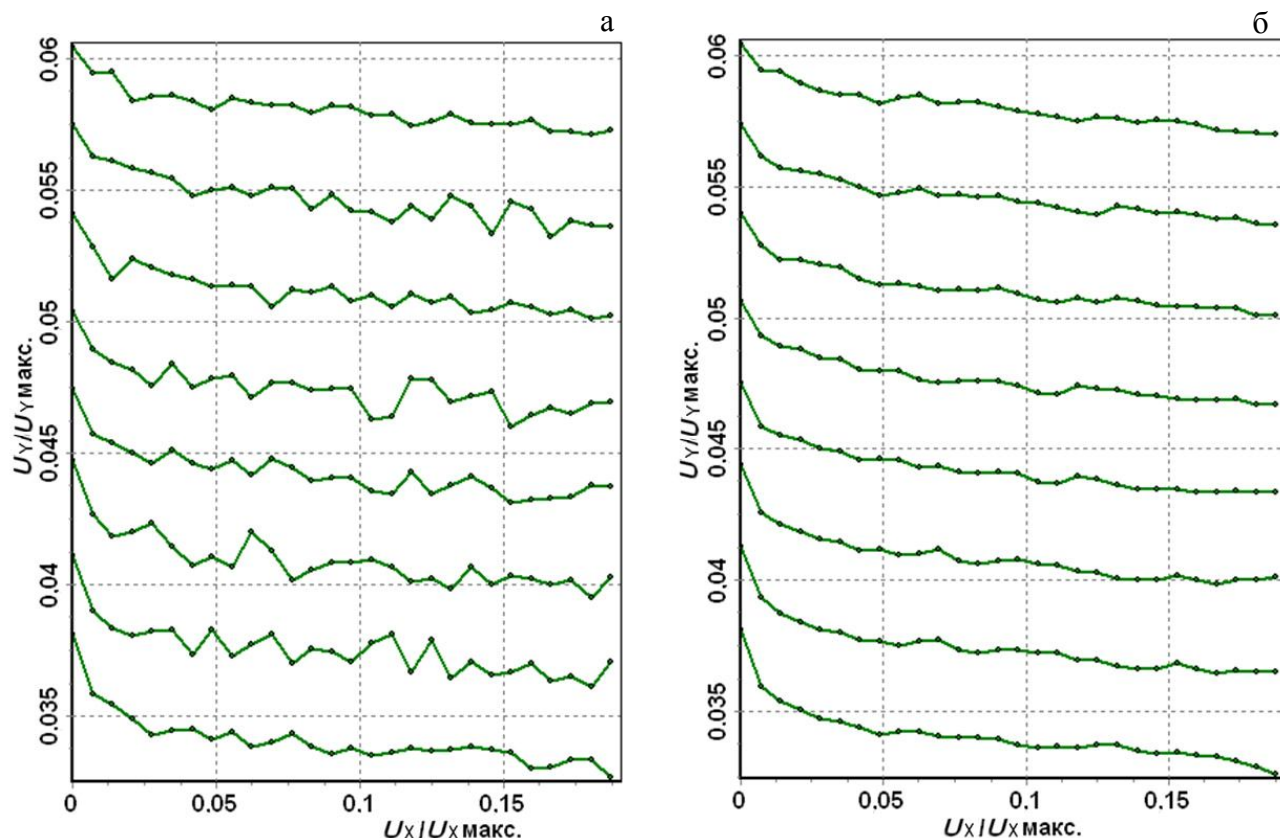


Рис. 7. Номограммы напряжений на сканере, измеренные при получении СЗМ-изображения, представленного на рис. 5.

а — первоначальная номограмма; б — номограмма после сглаживания

массив скорректированных координат точек измерений в единицах расстояния (нм), который используется для построения результирующего изображения. На этом этапе по данным массива скорректированных координат точек измерений (аргумент) и значений этих измерений (функция) опять строится сплайн и выполняется аппроксимация для точек, находящихся на равном расстоянии друг от друга; причем величина этого расстояния равна шагу сканирования (в рассматриваемом случае величина шага сканирования составляет 24 нм). При помощи описанного алгоритма было получено изображение рис. 5, б.

ВЫВОДЫ

Предложен алгоритм с дробными шагами сканирования, позволяющий улучшить метрологически достоверное пространственное разрешение СЗМ с оптическими энкодерами линейных перемещений. Работа алгоритма апробирована при СЗМ-визуализации тестовых объектов. Продемонстрирована возможность выполнять СЗМ-измерения с метрологически достоверным шагом, на

порядок меньшим, чем расстояние, обусловленное минимальным шагом оптического энкодера линейных перемещений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубок А.О., Горбенко О.М., Дворецких А.В. и др. Применение оптических энкодеров в микросканерах СЗМ с большим диапазоном сканирования // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 2. С. 3–12.
2. URL: (<http://www.Renishaw.com>).

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Голубок А.О., Горбенко О.М., Сапожников И.Д., Фельштын М.Л.)

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (Голубок А.О.)

ЗАО "Нанотехнологии-МДТ", Москва (Котов В.В.)

Материал поступил в редакцию 30.07.2009.

ON THE SCANNING ALGORITHM IN SPM WITH OPTICAL LINEAR ENCODERS

**A. O. Golubok^{1,2}, O. M. Gorbenko¹, V. V. Kotov³,
I. D. Sapozhnikov¹, M. L. Felshtyn¹**

¹*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

²*Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*

³*Joint-Stock Company "Nanotechnology-MDT", Moscow*

The algorithm of improving the space resolution in SPM equipped by typical linear optical encoders is suggested. The results of this algorithm implementation are demonstrated by the SPM- images of the test objects.

Keywords: scanning probe microscopy, optical linear encoders, microscanner, space resolution