

МЕТОД УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ СКАНЕРОМ В СКАНИРУЮЩЕМ ТУННЕЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ

П.В. Гуляев, М.Р. Гафаров, Е.Ю. Шелковников, А.В. Тюриков, Н.И. Осипов

В работе решается задача повышения производительности сканирующего туннельного микроскопа с применением прогнозирования возмущающих воздействий и формирования упреждающих сигналов управления на базе полученных прогнозных оценок. Для увеличения точности прогнозирования предложен метод последовательного рекурсивного вычисления ошибок более высоких порядков в виде конечных разностей с использованием одной и той же функции предсказания. Показано, что упреждающее воздействие следует синхронизировать с прогнозируемым возмущающим воздействием, а также, что даже при наличии ошибок прогноза наблюдается повышение скорости обработки возмущающих воздействий.

Ключевые слова: туннельный микроскоп, управление сканером, прогнозные оценки, возмущающие воздействия

В зондовой микроскопии высокая скорость сканирования поверхности является решающим фактором для успешного исследования образцов в реальном масштабе времени. Поэтому в настоящее время значительное внимание уделяется разработке методов упреждающего (feedforward) управления [1-3], позволяющего существенно повысить скорость сканирования. В большинстве этих методов в систему управления вводятся звенья с передаточной функцией, инверсной по отношению к передаточной функции управляемого устройства. Ниже предлагается подход к повышению производительности зондового микроскопа (туннельного, в частности), основанный на прогнозировании возмущающих воздействий и формировании упреждающих сигналов управления на базе полученных прогнозных оценок.

В туннельной микроскопии прогнозирование нашло успешное применение в системах адаптивного управления сканированием и сбором информации [4,5]. Это дает основание предполагать, что его использование для упреждающего управления сканирующим устройством может оказаться таким же эффективным. Характер получения растровых изображений в технике зондовой микроскопии предполагает последовательное формирование элементов строки с последующим переходом к следующей строке. Для изображений объектов с ограниченным пространственным спектром информация из полученных ранее строк может служить базой для определения прогнозных оценок элементов изображения в последующих строках. При выполнении прогнозирования априорно предполагается существование определенной кор-

реляционной связи между соседними отсчетами на статистически значимом интервале. Результат прогнозирования существенно зависит от выбора класса функции предсказания (ФП), отвечающего физической природе моделируемого процесса, а также от числа членов ряда экстраполирующего выражения.

Большинство методов предсказания, основанных на статистической взаимосвязи уровней яркости отдельных точек изображения, формируют его оценку в виде линейной комбинации яркостей m предшествующих

точек:
$$\bar{Z}_n = \sum_{i=1}^m \alpha_i Z_{n-i}$$
. Такие методы интенсивно разрабатывали и исследовали в основном для передачи телевизионных изображений, и соответствующие результаты довольно широко представлены в литературе [6,7].

Анализ этих методов и их экспериментальное исследование на сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) позволили заключить, что они непосредственно не могут быть реализованы в СТМ – одни из-за того, что не дают удовлетворительной точности предсказаний, другие – из-за высокой вычислительной сложности. Недостатки методов обусловлены, на наш взгляд, недостаточной адаптивной способностью к особенностям формирования СТМ-изображений (широкому разнообразию текстур на изображениях, высокому уровню помех, большому диапазону функции яркости и т.д.), причем адаптация в них чаще базируется на вариациях с набором предсказателей для разных фрагментов изображения или на учете контекста в точке предсказания. При этом, как правило, порядок модели (размер анализируемой окрест-

РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

ности точки) остается неизменным. Представляется возможным повысить эффективность предсказания за счет вариации такого параметра как порядок модели, причем начальная (базовая) модель должна отвечать поставленным условиям реализации – простота и низкая вычислительная сложность для работы в реальном масштабе времени.

С учетом ограничений на вычислительную сложность алгоритмов был выбран базовый набор ФП (рисунок 1):

$$P_1 = z_2; \quad P_2 = 2z_2 - z_5; \quad P_3 = (z_1 + z_2 + z_3 + z_4)/4;$$

$$P_4 = 3/4 z_1 + 3/4 z_2 - 1/2 z_3; \quad P_5 = z_1 + z_2 - z_3;$$

$$P_6 = z_2 + (z_1 - z_3)/2; \quad P_7 = z_1 + (z_2 - z_3)/2.$$

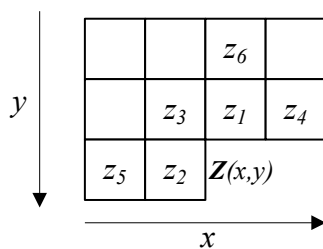


Рисунок 1 - Смежные элементы для прогноза

Исходя из изложенного, предлагается осуществлять прогнозирование методом последовательного применения одной и той же ФП, имеющей простую программную или аппаратную реализацию. Адаптационные свойства применяемой ФП к яркостным характеристикам изображения и уровню помех должны обеспечиваться регулируемым уровнем декорреляции изображения за счет вариации порядка модели.

Для увеличения точности прогнозирования предложен метод последовательного рекурсивного вычисления ошибок более высоких порядков в виде конечных разностей с использованием одной и той же функции предсказания P_k :

$$\varepsilon^0(x, y) = Z(x, y) - \hat{Z};$$

$$\varepsilon^1(x, y) = \varepsilon^0(x, y) - \hat{\varepsilon}^0; \quad (1)$$

$$\varepsilon^2(x, y) = \varepsilon^1(x, y) - \hat{\varepsilon}^1;$$

$$\dots$$

$$\varepsilon^u(x, y) = \varepsilon^{u-1}(x, y) - \hat{\varepsilon}^{u-1};$$

где $\hat{Z} = P_k(Z)$, $\hat{\varepsilon}^i = P_k(\varepsilon^{i-1})$.

Отсюда следует, что можно обозначить $\hat{Z} = \hat{\varepsilon}^{-1}$.

Качество прогнозирования различных ФП оценивалось с помощью дисперсии ошибок предсказания.

В таблице 1 для различных ФП приведена зависимость дисперсии ошибок предсказания различных порядков для всего СТМ-изображения. Эффект повышения точности прогнозирования в данном методе можно оценить с помощью коэффициента

$$\mu = \frac{D[\varepsilon^0]}{D_{\min}[\varepsilon]}$$

при сравнении полученной минимальной дисперсии ошибки с дисперсией

ошибки нулевого порядка, получаемой однократным применением выбранной ФП. Здесь видно, что дальнейшее повышение порядка вычисляемых ошибок приводит к их нарастанию. Такое поведение ошибок прогнозирования обусловлено тем, что они представляют конечные разности порядка h . Согласно [8], если функция $Z(x)$ представлена с некоторой заданной точностью, то функция $\varphi(h) = \max|\varepsilon^h|$ убывает при малых h и растет при больших h . Можно отметить, что дисперсии $D[\varepsilon^h]$ имеют четко выраженный минимум при нарастании порядка ошибок, причем минимум для двумерной модели предсказания меньше.

С этой точки зрения становится актуальной задача автоматической настройки параметра $h_{\text{опт}}$ в процессе прогнозирования, при котором обеспечивается максимальная степень приближения ФП к регулярной составляющей данных. В отдельных фрагментах изображения оптимальными будут различные

Табл.1

Динамика изменения дисперсии ошибок предсказания различных порядков

| Дисперсия | Функция предсказания | | | | | | |
|--------------------|----------------------|--------------|---------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | P_5 | P_6 | P_7 |
| $D[\varepsilon^0]$ | 9792.24 | 319.52 | 41497.21 | 6096.48 | 676.92 | 2790.16 | 17278.34 |
| $D[\varepsilon^1]$ | 319.52 | 11.90 | 3292.65 | 72.31 | 5.43 | 26.61 | 602.59 |
| $D[\varepsilon^2]$ | 30.29 | 75.80 | 415.96 | 7.35 | 32.37 | 6.85 | 40.87 |
| $D[\varepsilon^3]$ | 11.90 | 1048.22 | 145.57 | 40.81 | 393.01 | 42.35 | 48.03 |
| $D[\varepsilon^4]$ | 22.08 | 15018.90 | 183.98 | 294.82 | 5060.88 | 306.01 | 308.48 |
| μ | 822.87 | 26.85 | 285.07 | 829.45 | 124.66 | 407.32 | 422.76 |

значения h_{opt} , зависящие от локальных свойств изображения. Поэтому алгоритм настройки h_{opt} должны обладать дополнительными адаптивными свойствами.

В алгоритме, реализующем данный метод, формируется глобальная статистика выбора значений h в точках просмотренной части изображения по условию:

$$h_{opt}(x, y) = \arg \min_i (|\varepsilon^i(x, y)|). \quad (2)$$

Для реализации алгоритма используются $(u+1)$ счетчиков $\{C_0, C_1, \dots, C_u\}$, в каждом из которых подсчитывается количество выбранных значений по условию (2). Результат предсказания для функции Z в точке (x, y) вычисляется по формуле

$$\tilde{Z}(x, y) = \sum_{i=-1}^{h_{opt}} \tilde{\varepsilon}^i(x, y), \quad (3)$$

где оптимальное значение h_{opt} определяется из условия

$$h_{opt} = \arg \max_j (C_j), \quad (4)$$

а выходная ошибка предсказания равна

$$\varepsilon_f(x, y) = Z(x, y) - \tilde{Z}(x, y). \quad (5)$$

Применение тех или иных функций предсказания может зависеть от конкретного назначения прогноза. Например, функция $P1(Z)$ использовалась для адаптивной дискретизации изображений сканирующего туннельного микроскопа. В данной работе рассмотрены возможности применения прогнозирования

для повышения быстродействия системы регулирования вертикального положения зонда СТМ. Такие системы, как правило, основываются на использовании цепей отрицательной обратной связи. Прогнозирование в данном случае позволяет реализовать прямой канал управления и повысить скорость обработки сигналов за счет исключения времени прохождения сигнала через объект регулирования и цепь обратной связи [9]. На практике целесообразно построение комбинированной системы регулирования, в которой блок прогноза используется для упреждающего воздействия на исполнительный элемент, а обратная связь – для отработки ошибок прогноза, значительно меньших по сравнению с действительным возмущающим воздействием. Структурная схема подобной системы, управляемой сигнальным процессором, представлена на рисунке 2. Для исследования работы системы составим ее в виде (рисунк 3), пригодном для изучения с помощью программ схемотехнического моделирования.

Не описывая конкретной схемной реализации звеньев модели, отметим, что ПТН, ЛУ и ВУ можно представить в виде апериодических звеньев 1 порядка, Пс – в виде колебательного звена, И – в виде интегрирующего звена с задержкой или изодромного звена. Возмущающее воздействие представлено источником V1, упреждающее – источником V2 с аналогичной формой сигнала.

Реакция системы регулирования туннельного промежутка на возмущающее воз-

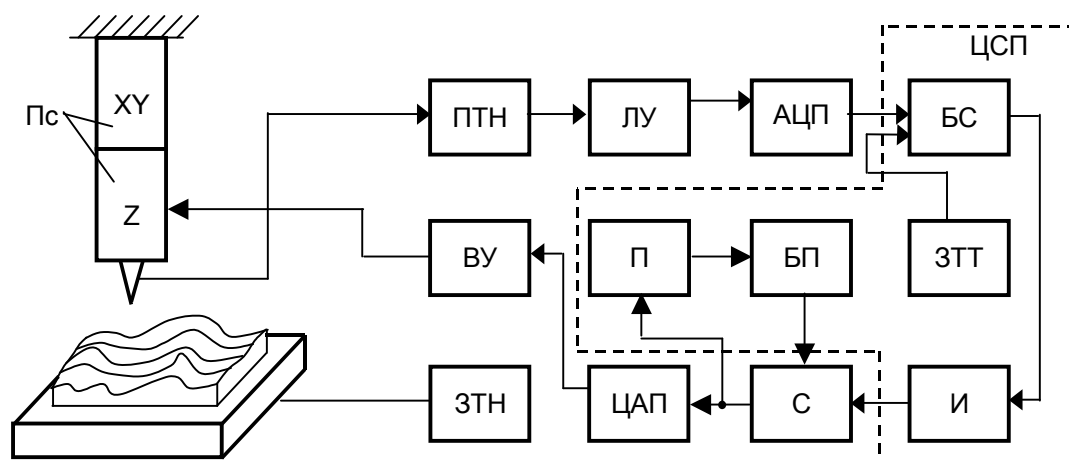


Рисунок 2 - Структурная схема системы регулирования туннельного промежутка: Пс – пьезосканер; ПТН – преобразователь ток-напряжение; ЛУ – логарифмирующий усилитель; БС – блок сравнения; БП – блок прогноза; П – память; ЗТН – задатчик туннельного напряжения; ЗТТ – задатчик величины туннельного тока; И – интегратор; ВУ – высоковольтный усилитель; ЦСП – цифровой сигнальный процессор

РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

действие ($t_1=100$ мкс, $t_2=400$ мкс) (рисунок 4) при различной точности прогноза представлена на рисунке 5.

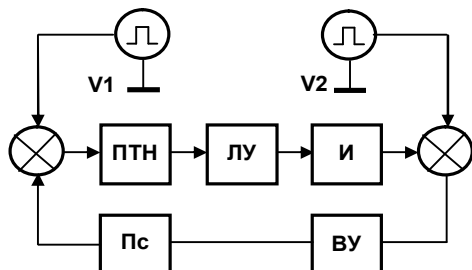


Рисунок 3 - Аналоговая модель цепи регулирования туннельного промежутка: V1 – источник возмущающего прямоугольного воздействия; V2 – источник упреждающего воздействия, зависящий от данных прогноза

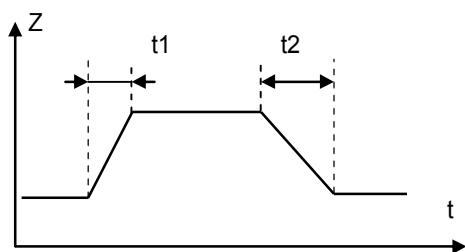


Рисунок 4 - Форма возмущающего воздействия

Точность прогноза определяется соотношением амплитуды сигнала источника V2 и величины V_0 , соответствующей изменению выходного сигнала интегратора при полной компенсации возмущающего воздействия.

Анализ особенностей графиков (рисунок 5), наиболее явно проявляющихся на крутом фронте, показал следующее. Быстродействие системы регулирования при упреждающем управлении значительно повышается.

При этом данное повышение тем существеннее, чем выше точность прогноза.

Выводы

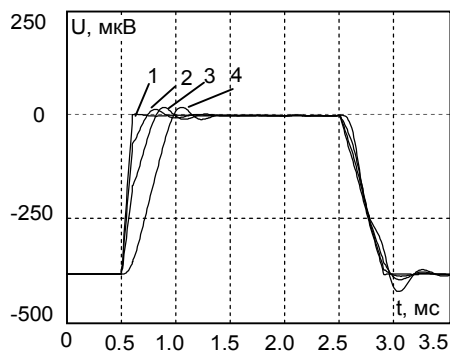
Таким образом, результаты предварительных исследований указывают на высокую практическую ценность предложенного метода и позволяют сделать следующие выводы.

1. Упреждающее воздействие следует синхронизировать с прогнозируемым возмущающим воздействием.

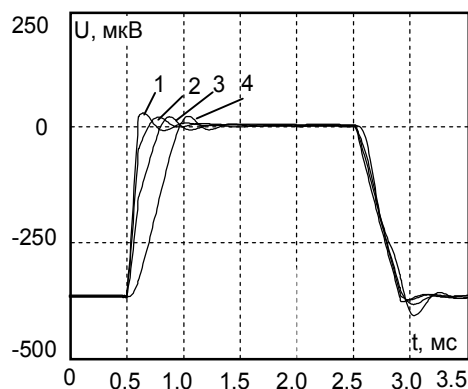
2. Даже при наличии ошибок прогноза наблюдается повышение скорости отработки возмущающих воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. WO Patent 2009/025886 A2. Closed-loop controller and method for fast scanning probe microscopy.



а)



б)

Рисунок 5 - Изменение напряжения на входе ВВУ при различной точности прогноза (1 – $V_2=V_0$; 2 – $V_2=0.8 \cdot V_0$; 3 – $V_2=0.5 \cdot V_0$; 4 – $V_2=0$); а – упреждающее управление без задержки; б – с задержкой 10 мкс

2. Clayton, G.M. Inverse-feedforward of charge-controlled piezopositioners // G.M. Clayton et al. - Mechatronics 18 (2008), P. 273–281.
3. Темников, Ф.Е. Методы и модели развертывающих систем / Ф.Е. Темников. - М.: Энергоатомиздат, 1987.-134с.
4. Липанов, А. М. Адаптивная система развертки изображения и формирования измерительной информации в сканирующем туннельном микроскопе// А. М. Липанов, П. В. Гуляев, Е. Ю. Шелковников. -Датчики и системы.- №7.-2004.- С. 14-18.
5. Липанов, А.М. Устройство управления скоростью сканирования туннельного микроскопа. Патент РФ 2269803 // А.М. Липанов, П.В. Гуляев, Е.Ю. Шелковников и др. - Изобретения. №4. – 2006.
6. Лебедев, Д.С. Телевидение и теория информации./ Д.С. Лебедев, И. И. Цуккерман . - Л.: Энергия, 1965.
7. Хуанг, С. Обработка изображений / С. Хуанг, В. Шрейбер, О. Третьяк - Сб. науч. тр. «Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин» /Под ред. Эндрюса Х. – М.: Мир, 1973. – С. 30-39.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В МЕТОДЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

8. Бахвалов, Н.С. Численные методы. Часть.1. – / Н.С. Бахвалов. - М.: Наука. 1973 – 632 с.
9. Денисенко, В. ПИД-регуляторы. Принципы построения и модификации// В. Денисенко. - Современные технологии автоматизации. 2006.- №4.- С. 66-74.

К.т.н., с.н.с. Гуляев П.В., аспирант Гафаров М.Р., д.т.н., с.н.с. Шелковников Е.Ю., к.ф.-м.н., с.н.с. Тюриков А.В., к.т.н., с.н.с. Осипов Н.И. – (8888)99-!!!-!!!, Институт прикладной механики УрО РАН, г. Ижевск

УДК 620.179.14.05:681.586:004.387

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В МЕТОДЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

С.Ф. Дмитриев, Д.Н. Лященко, А.В. Новоженев, А.В. Ишков

В статье рассмотрены особенности реализации аппаратной части измерительных программно-аппаратных комплексов, реализующих метод вихревых токов. Приводятся результаты решения задачи отклика вихретокового преобразователя, оптимизированные конструкции сверхминиатюрных датчиков, вариант решения задачи совместимости специализированного ПО виртуализированных приборов с произвольной звуковой картой ПК для случая измерения электропроводности материалов.

Ключевые слова: виртуализированный измерительный прибор, метод вихревых токов, сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь, аппаратная кривая, электропроводность.

Концепция виртуализированных измерительных приборов (ВИП) - современных измерительных программно-аппаратных (ПА) комплексов базируется на максимальной виртуализации функций измерительного устройства, не связанных с непосредственным получением информации от контролируемого объекта и среды [1]. Ее практическое воплощение стало возможным с появлением современных высокопроизводительных ЭВМ, позволяющих основной алгоритм работы прибора, в части первичной обработки сигнала, его преобразовании, сравнении со стандартом, накоплении результатов последовательных измерений и их статистическую обработку, вывод полученных результатов и управление функциями измерителя, реализовать в виде специальной компьютерной программы, написанной на языке высокого уровня [2].

У ВИП всегда открытой остается задача получения цифрового сигнала от первичного датчика для его последующей обработки специализированной компьютерной программой - виртуальным прибором, однако для многих прикладных задач оказываются достаточными возможности встроенных практически в любую ЭВМ АЦП/ЦАП - звуковых карт.

Необходимыми и достаточными условиями такого применения звуковых карт являются низкие мощности, развиваемые в цепи первичного измерительного преобразова-

теля - датчика, и ограниченный звуковым, диапазон используемых частот.

Соблюдение этих условий позволяет реализовывать большую гамму измерительных устройств, находящих применение для неразрушающего контроля различных параметров объектов и окружающей среды [3].

В задачах неразрушающего контроля особое место отводится методу вихревых токов (МВТ). МВТ базируется на возбуждении в контролируемом объекте или среде под воздействием переменного магнитного поля, создаваемого вихретоковым преобразователем (ВТП), вихревых токов и одновременной регистрации ВТП вторичного поля. Величина вторичного поля сложным образом зависит от параметров контролируемого объекта и если должным образом выстроить математическую модель отклика преобразователя на поле вихревых токов, то становится возможным определять отдельно более десятка параметров исследуемого объекта [3, 4].

Задача отклика первичного преобразователя в МВТ является не только математической, сводящейся к отысканию решения соответствующего уравнения для векторного потенциала в случае определенного значения обобщенного параметра, учитывающего свойства объекта, но и физической и инженерной - связанной с установлением оптимальных условий измерений и конструкции самого датчика, а при создании ВИП к ней