

УДК 681.2-5

© М. А. Михайлов, В. В. Манойлов

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ "NANO EDUCATOR" НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

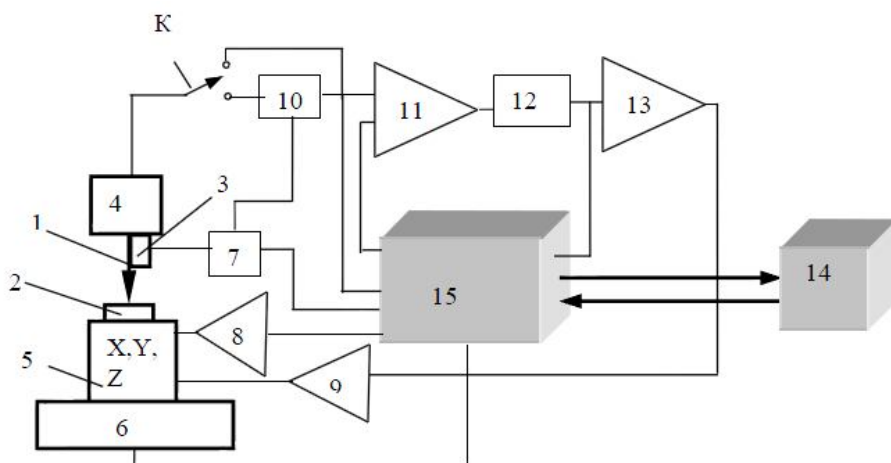
В статье рассматриваются методы синтеза и анализа системы цифровой автоматической регуляции сканирующего зондового микроскопа. Представлена физико-математическая модель СЗМ в атомно-силовом и туннельных режимах, реализованная в программной среде моделирования MATLAB Simulink. Предложена методика расчета оптимальных характеристик системы автоматической регуляции. Представлены результаты синтеза ПИД-регулятора предложенной методикой.

*Кл. сл.:* методы цифрового автоматического управления, сканирующая зондовая микроскопия, расчет оптимальных параметров регулирования, среда моделирования matlab simulink

### ВВЕДЕНИЕ

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) на сегодняшний день является базовым инструментом нанотехнологий. Он позволяет визуализировать поверхность и изучать широкий ряд характеристик изучаемого образца. Основным недостатком подобных систем является поточечное сканирование с применением цепей отрицательной обратной связи (ООС), что, хотя и увеличивает точность измеряемых величин, в значительной степени замедляет работу СЗМ.

На представленной структурной схеме (рис. 1) представлены основные составляющие элементы системы управления (СУ) СЗМ "Nano Educator" [1]. Сигнал, поступающий с зонда 1, характеризует силу взаимодействия между зондом и поверхностью образца 2. Для достижения точных результатов сканирования эту величину поддерживают постоянной с помощью смещения образца сканером 5 в плоскости оси Z. Ошибка рассогласования формируется либо на синхронном детекторе 10, либо на аналоговом выходе контроллера



**Рис. 1.** Структурная схема СУ СЗМ.

1 — зонд; 2 — образец; 3 — пьезовибратор; 4 — датчик взаимодействия; 5 — сканер X, Y, Z; 6 — система сближения зонда с образцом; 7 — генератор синусоидального напряжения; 8, 9 — высоковольтные усилители; 10 — синхронный детектор; 11 — дифференциальный усилитель; 12 — интегратор; 13 — усилитель напряжения; 14 — персональный компьютер; 15 — контроллер КСЗМ

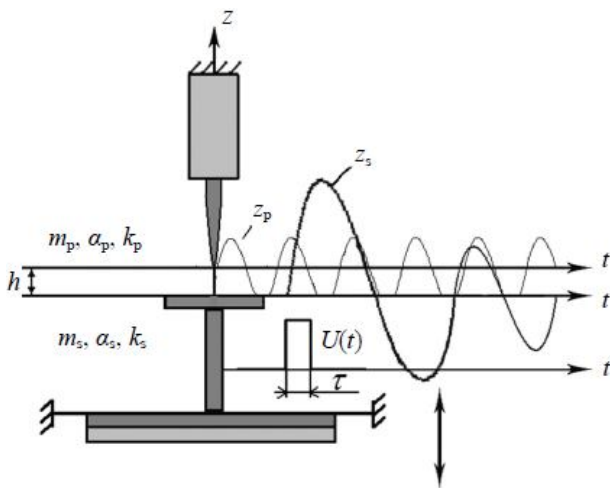
сканирующего зондового микроскопа (КСЗМ) 15 в зависимости от режима сканирования: атомно-силового режима в полуконтактной моде или в туннельном режиме соответственно. Дифференциальный усилитель 11, интегратор 12, усилители напряжения 13 и высоковольтный усилитель 9 замыкают цепочку ООС.

Для обеспечения требуемой скорости и точности сканирования стоит открытая задача оптимизации параметров регулирующих компонентов цепи ООС. На сегодняшний день элементы регулирования ООС в изготавливаемых СЗМ собраны на основе аналоговых дискретных элементов — операционных усилителей. Подобная система не представляется удобным инструментом для проведения работ по оптимизации алгоритмов регулирования.

Было принято решение создать программную реализацию физико-математической модели СЗМ, разработать программные средства для расчета параметров системы регуляции, создать цифровое аппаратно-программное средство для реализации полученных параметров системы автоматического регулирования.

### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОСКОПА "NANO EDUCATOR"

Рассмотрим упрощенную задачу одномерного



**Рис. 2.** Одномерная модель колебаний зонда в упругом приближении.

$z_p, z_s$  — смещение от положения равновесия зонда и сканера с образцом соответственно;  $m_p, \alpha_p, k_p$  — эффективная масса, коэффициент трения и жесткость колебательной системы зонда;  $m_s, \alpha_s, k_s$  — эффективная масса, коэффициент трения и жесткость колебательной системы сканера с образцом;  $U(t)$  — управляющее напряжение, приложенное к пьезоэлементу сканера;  $h$  — расстояние между равновесными положениями зонда и образца на сканере

движения. Запишем одномерные уравнения движения образца вдоль координаты  $z_s$  и зонда вдоль координаты  $z_p$  (рис. 2). Упростив задачу, принимая во внимание только упругое взаимодействие, получим:

$$m_p \ddot{z}_p = -\alpha_p \dot{z}_p + k_p z_p + f_0 \cos(\omega t) + f_g (z_s - z_p - h), \quad (1)$$

$$m_s \ddot{z}_s = \alpha_s \dot{z}_s - k_s (z_s - \gamma U(t)), \quad (2)$$

где  $z_p$  и  $z_s$  — смещения от положения равновесия зонда и сканера с образцом соответственно;  $m_p, \alpha_p, k_p$  — эффективная масса, коэффициент трения и жесткость колебательной системы зонда;  $f_g$  — сила упругого взаимодействия между зондом и образцом;  $f_0, \omega$  — амплитуда и частота вынуждающей силы, приложенной к зонду;  $h$  — расстояние между равновесными положениями зонда и образца на сканере;  $m_s, \alpha_s, k_s$  — эффективная масса, коэффициент трения и жесткость колебательной системы сканера с образцом;  $U(t)$  — управляющее напряжение, приложенное к пьезоэлементу сканера;  $\gamma$  — чувствительность пьезосканера [2].

Из кривой подвода зонда к образцу мы получаем амплитуду вынуждающей силы  $f_0$  и характеристику изменения амплитуды колебаний при подводе зонда к образцу при полуконтактном режиме  $f(h)$ . Так как относительную массу колеблющегося зонда рассчитать достаточно трудно, то принимаем ее за величину зонда. В дальнейшем эта величина будет скорректирована после проведения экспериментов. Зная добротность сканера, частоту резонанса зонда и массу сканера, получаем остальные неизвестные в этих дифференциальных уравнениях (подробнее в [2]).

### Программная реализация физико-математической модели

Для того чтобы создать гибкую программную модель и уменьшить трудозатраты, была выбрана среда моделирования MATLAB Simulink. На базе описанных дифференциальных уравнений были созданы программные модели (см. рис. 3, 4). В моделях учтены основные функциональные части СЗМ. Также в моделях возможно задавать параметры текущего эксперимента, например геометрические параметры конкретного зонда и работы выхода зонда и образца. С помощью этих моделей можно оценить переходные характеристики систем, точность системы автоматического регулирования, методические погрешности. В моделях не учтены инструментальные ошибки.

### МЕТОДЫ СИНТЕЗА ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для примера в моделях система автоматического регулирования представлена в виде

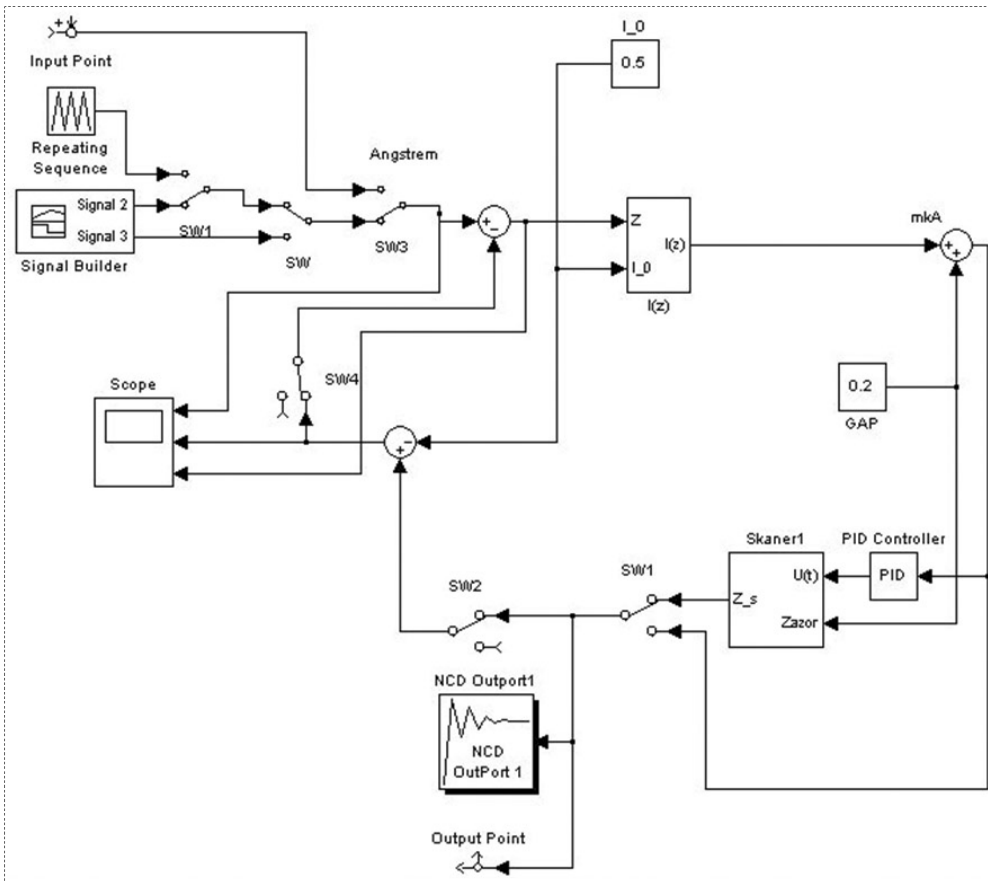


Рис. 3. Модель СЗМ в СТМ режиме

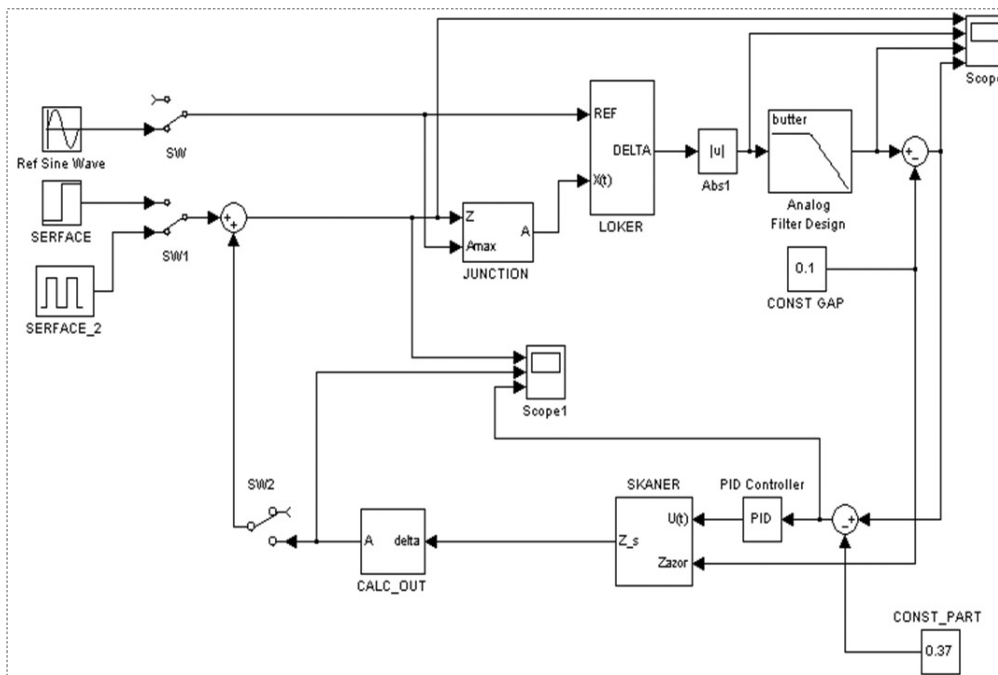


Рис. 4. Модель СЗМ в АСМ режиме

ПИД-регулятора. В среде MATLAB Simulink существует Инструментальный пакет (ИП) Nonlinear

Control Design Blockset (NCD-Blockset), который предоставляет в распоряжение пользователя гра-

фический интерфейс для настройки параметров динамических объектов, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов. В качестве средства для достижения указанной цели принимается оптимизационный подход, обеспечивающий минимизацию функции штрафа за нарушение динамических ограничений. При помощи данного инструмента можно настраивать параметры нелинейной Simulink-модели, в качестве которых может быть заявлено любое количество переменных, включая скаляры, векторы и матрицы. Особую значимость имеет то обстоятельство, что в про-

цессе настройки могут учитываться неопределенности параметрического типа математической модели, что позволяет синтезировать робастные законы управления [3].

Таким образом, включая блок NCD (рис. 5) при разомкнутом контуре ООС, производим оптимизацию ПИД-регулятора. В дальнейшем этот ПИД-регулятор будет работать с минимальными ошибками регулирования. Этим методом были спроектированы оптимальные ПИД-регуляторы для моделей СТМ и АСМ режимов.

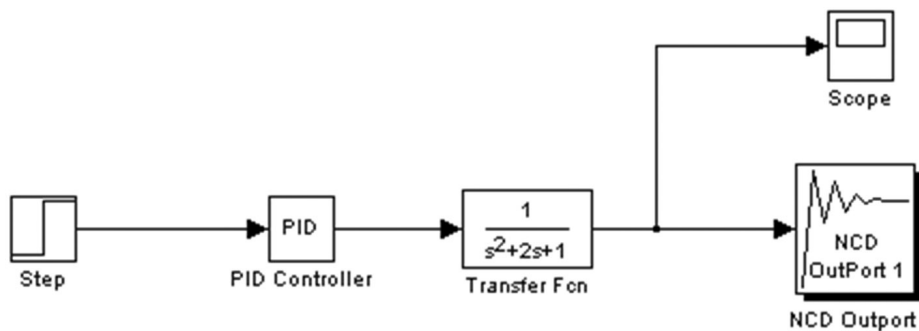


Рис. 5. Пример включения блока NCD

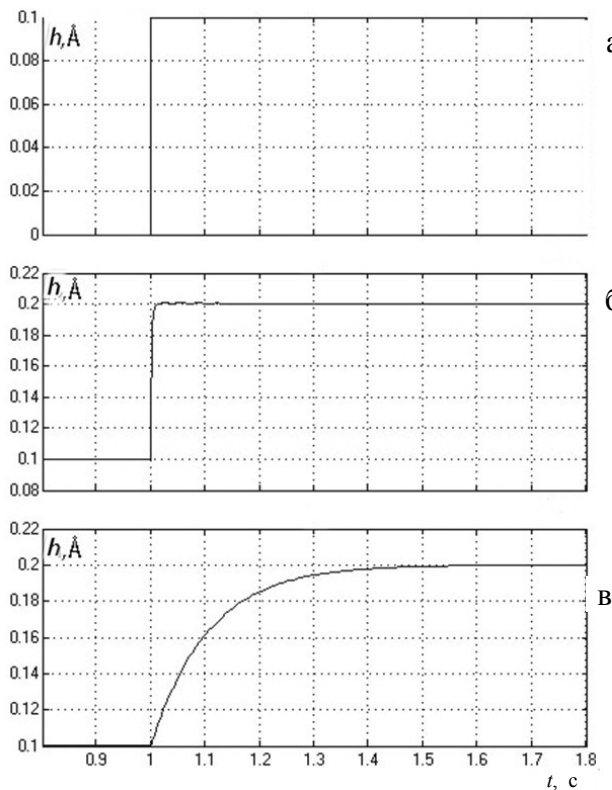


Рис. 6. Переходные характеристики модели СТМ режима при входном воздействии сигнала типа "ступенька". а — входное воздействие, б — с ПИД-регуляцией, в — без ПИД-регуляции

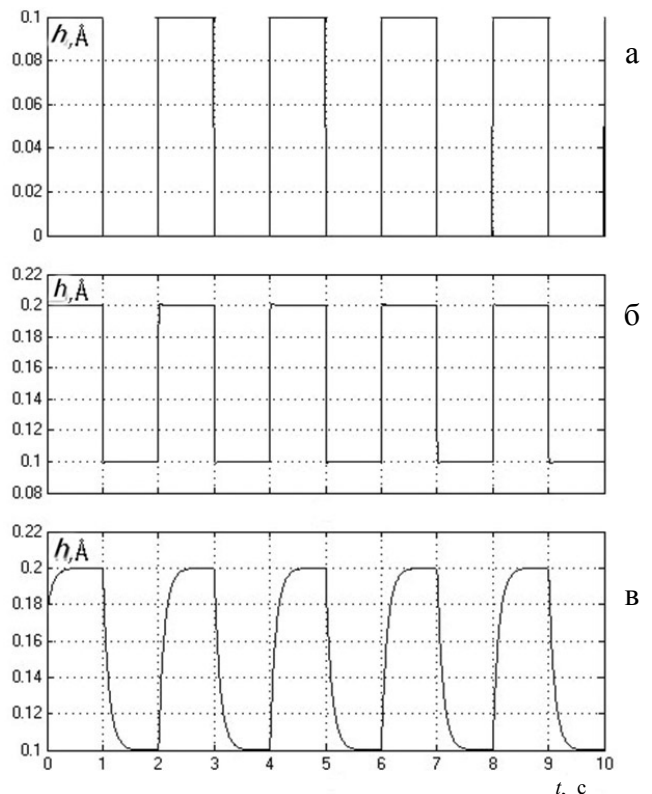
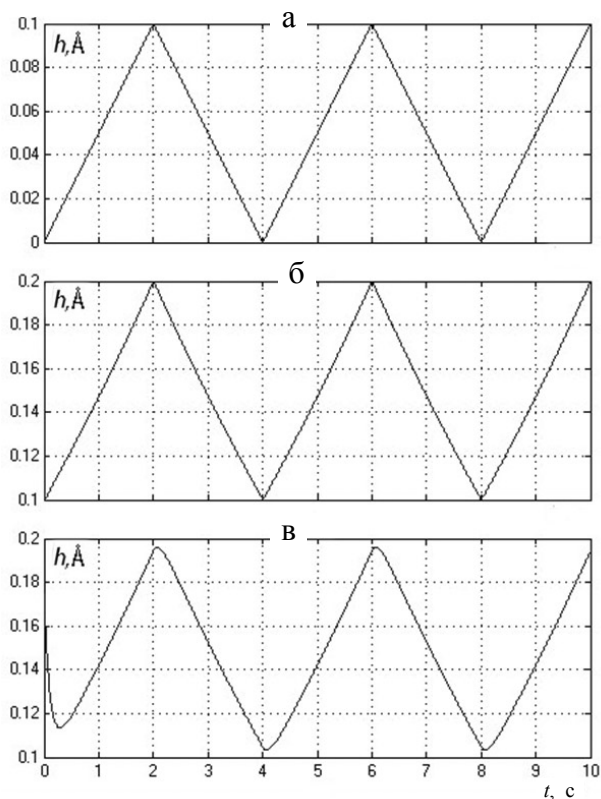


Рис. 7. Переходные характеристики модели СТМ режима при входном воздействии сигнала типа "меандр". а — входное воздействие, б — с ПИД-регуляцией, в — без ПИД-регуляции



**Рис. 8** Переходные характеристики модели СТМ режима при входном воздействии сигнала типа "пила".  
а — входное воздействие, б — с ПИД-регуляцией, в — без ПИД-регуляции

**СТМ режим**

Проанализируем переходные характеристики разомкнутой цепи модели без введения ПИД-регулятора и с введением его по стандартным входным сигналам типа "ступенька" (рис. 6), "мандр" (рис. 7), "пила" (рис. 8).

В табл. 1 приведена оценка качества регулирования для СТМ режима по переходному процессу, при типовом входном воздействии типа "ступенька".

**АСМ режим**

Аналогично предыдущему разделу представим результаты синтеза модели системы автоматической регуляции для АСМ режима.

В табл. 2 приведена оценка качества регулирования для АСМ режима по переходному процессу типового входного воздействия типа "ступенька", а на рис. 9–11 — переходные характеристики модели при входных воздействиях "ступенька", "мандр", "пила".

**Табл. 1.** Оценка качества регуляции СТМ режима по переходному процессу при входном воздействии типа "ступенька"

Характеристика	Наличие ПИД-регуляции	
	Да	Нет
$\Delta$ , (1%)	0.0001	0.0001
Время переходного процесса $t_n$ , мс	380	710
Характеристика запаса устойчивости $\sigma$ , %	0.69	0

**Табл. 2.** Оценка качества регуляции АСМ режима по переходному процессу при входном воздействии типа "ступенька"

Характеристика	Наличие ПИД-регуляции	
	Да	Нет
$\Delta$ , (1%)	0.01	0.01
Время переходного процесса $t_n$ , мс	140	580
Характеристика запаса устойчивости $\sigma$ , %	8.87	7.97

**ДАЛЬНЕЙШЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ**

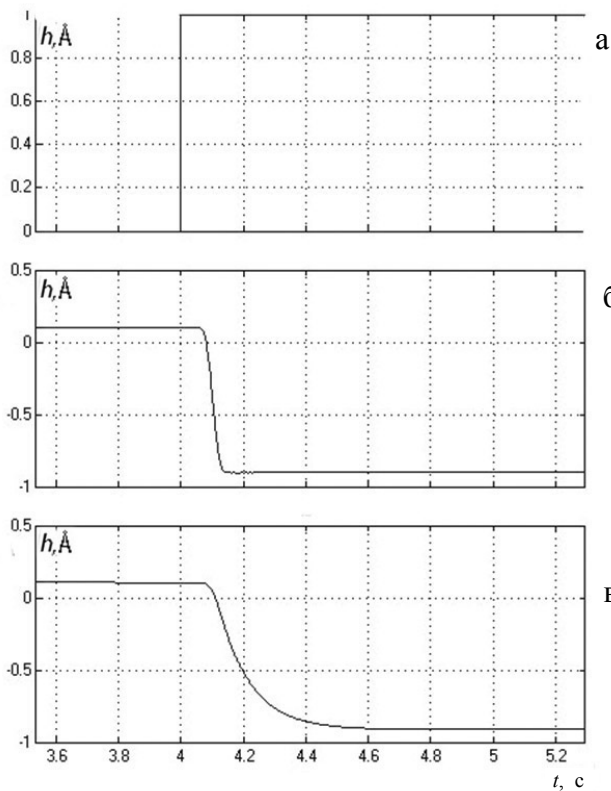
Нами были созданы программные модели основных режимов СЗМ и разработана методика изучения и синтеза системы автоматического регулирования для СЗМ. В дальнейшем планируется произвести эксперименты и реализовать на базе цифрового сигнального процессора (ЦСП) полученные параметры системы автоматического регулирования.

Нами были выбраны именно ЦСП по следующим соображениям.

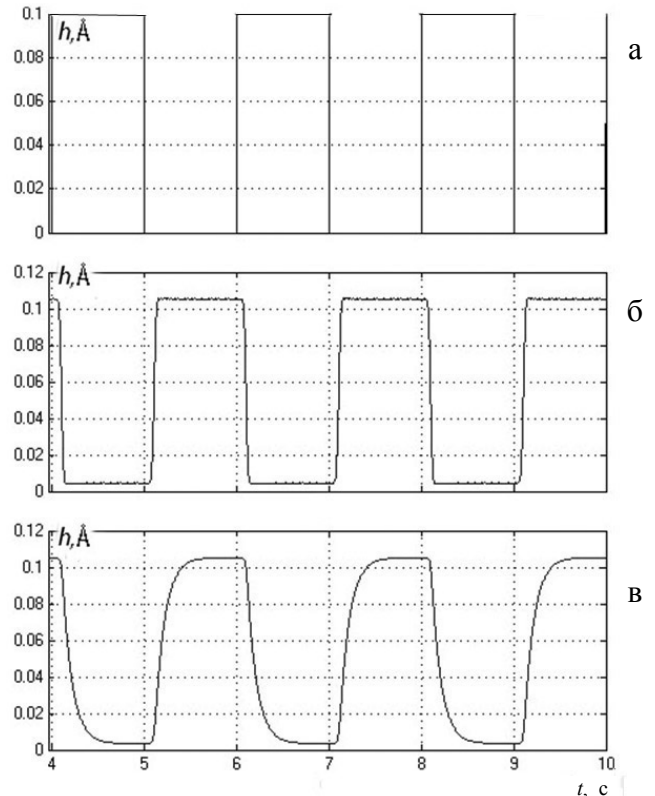
1. Реализация методов цифровой обработки сигналов (ЦОС), таких как ПИД-регулятор, КИХ- и БИХ-фильтры, намного производительней по сравнению с реализацией программным методом на базе простых процессоров.

2. Для задачи реализации алгоритмов ЦОС очень хорошо подходят программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Но программирование ПЛИС занимает много ресурсов у разработчика. В рамках нашей экспериментально-расчетной задачи подобные затраты неоправданны.

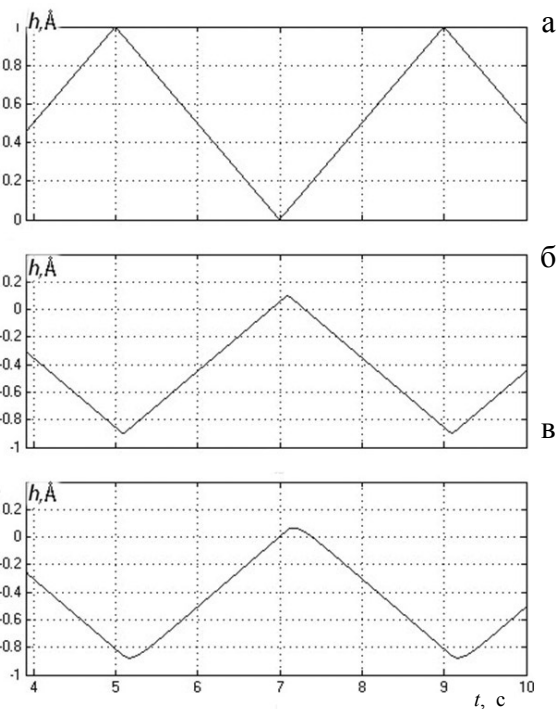
3. ЦОС обладает возможностью изменения своих параметров и структуры вплоть до изменений в режиме on-line. Это позволяет достаточно



**Рис. 9.** Переходные характеристики модели АСМ режима при входном воздействии сигнала типа "ступенька".  
а — входное воздействие, б — с ПИД-регуляцией, в — без ПИД-регуляции



**Рис. 10.** Переходные характеристики модели АСМ режима при входном воздействии сигнала типа "меландр".  
а — входное воздействие, б — с ПИД-регуляцией, в — без ПИД-регуляции



**Рис. 11.** Переходные характеристики модели АСМ режима при входном воздействии сигнала типа "пила".  
а — входное воздействие, б — с ПИД-регуляцией, в — без ПИД-регуляции

просто изучить поведение всей системы в целом при различных методах и параметрах ЦОС и подобрать оптимальный метод с оптимальными параметрами.

Для любого DSP поставляются различные средства, заготовки и примеры построения основных алгоритмов ЦОС.

### ВЫВОДЫ

Нами был создан удобный и гибкий виртуальный инструмент на базе программной среды MATLAB Simulink для симуляции работы СЗМ.

С его помощью можно предсказывать поведение системы при различных входных воздействиях (рельефе образца) и параметрах эксперимента (различные материалы образца, параметры зонда, сканера и т. д.).

Этот инструмент может быть полезен при изучении принципа работы и сигнальной обработки СЗМ, а также при конструировании и оптимизации системы автоматического регулирования петли обратной связи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубок А.О., Платунов А.Е., Сапожников И.Д. Система управления сканирующим зондовым микроскопом // Научное приборостроение. 2003. Т. 13, № 2. С. 25–31.
2. Голубок А.О., Пинаев А.Л., Чивилихин Д.С., Чивилихин С.А. Динамическая силовая литография на тонких металлических пленках в сканирующем зондовом микроскопе с пьезорезонансным датчиком локального взаимодействия // Научное приборострое-

ние. 2011. Т 21, № 1. С. 31–43.

3. Веремей Е.И., Погожев С.В. Пособие "Nonlinear Control Design Blockset". URL: (<http://matlab.exponenta.ru/>).

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Михайлов М.А.)*

*Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург (Манойлов В.В.)*

Контакты: Манойлов Владимир Владимирович, [manoilov\\_vv@mail.ru](mailto:manoilov_vv@mail.ru)

Материал поступил в редакцию 21.10.2011.

## ESTIMATION OF DIGITAL REGULATION PARAMETERS IN SCANNING PROBE MICROSCOPE "NANO EDUCATOR" ON THE BASIS OF PHYSICAL-MATHEMATICAL MODEL

M. A. Michailov<sup>1</sup>, V. V. Manoilov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research University Information Technology, Mechanics, Optics, Saint-Petersburg*

<sup>2</sup>*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg*

The article considers the methods of designing and analyzing of digital system regulation of scanning probe microscope. Physical-mathematical model of SPM in atom-force and tunnel modes is presented. This model was realized in software environment for MATLAB Simulink modeling. A method for calculation of optimal parameters of digital system regulation is suggested. The results of PID-regulator designing with the suggested method are presented.

*Keywords:* methods of designing and analyzing digital system of regulation, scanning probe microscopy, PID-regulator, software environment for modeling MATLAB