DOI: 10.18411/vntr2025-179-2

УДК 620.3

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАНОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

© Николай Алексеевич Серков, Павел Аркадьевич Скворцов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
Serkov1943@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрены достижения в развитии прецизионных многокоординатных машин с нанометрической точностью позиционирования в рабочем объёме ∅300 мм на Z = 50 мм. Эти машины, в первую очередь, предназначены для использования в области оптической литографии и функционализации поверхностей с помощью наноструктур для создания продуктов с ранее неизвестными свойствами. Новые принципы конструирования несущих систем (НС) и накопленный опыт при создании таких машин может быть применены при проектировании, изготовлении и эксплуатации также прецизионных многокоординатных металлорежущих станков, роботов и КИМ субмикронной точности.*
Ключевые слова: *нанотехнология, наноизмерения, наномашина, лазерный интерферометр, планарный механизм, материал Zerodur, ситалл-ЛГ, калибровка.*

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0016.

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF NANOMEASURING AND NANOTECHNOLOGY MACHINES

© N.A. Serkov, P.A. Skvortsov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Serkov1943@mail.ru

Abstract. *The achievements in the development of precision multi-coordinate machines with nanometric positioning accuracy in the working volume of ∅ 300 mm by Z = 50 mm are considered. These machines are primarily intended for use in the field of optical lithography and surface functionalization using nanostructures to create products with previously unknown properties. The new principles of design of load-bearing systems (NS) and the accumulated experience in the creation of such machines can be applied in the design, manufacture and operation also in precision multi-axis submicron precision metal cutting machines.*
Keywords*: nanotechnology, nanoscale measurements, nanomachine, laser interferometer, planar mechanism, Zerodur, material ситалл-ЛГ, calibration.*

Acknowledgements. *This research was supported by State Assignment from Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FFGU-2024-0016.*

Введение. В работе [1] отмечается, что полупроводниковая промышленность может существенно измениться в сторону мелкосерийного и индивидуального производства по причине широкого распространения индивидуального дизайна и решений для конкретных приложений, которые будут доминировать в будущем. В работе [2] отмечается, что **функционализация поверхностей с помощью наноструктур обладает огромным потенциалом для создания продуктов с ранее неизвестными свойствами и является предметом текущих международных исследовательских инициатив.** (Функционализация – это процесс придания материалу новых свойств или функций путем модификации его поверхности или структуры. В химии и материаловедении, функционализация часто подразумевает введение в молекулу или на поверхность материала химически активных групп, которые позволяют материалу взаимодействовать с другими веществами или выполнять определенные функции.)

В работе Мур GE (2006) [3] говорится, что при «впихивании» большего количества компонентов в интегральные схемы существует проблема регулярно измерять, контролировать и структурировать на атомном уровне, т.е. работать с дискретностью – ангстрем (внесистемная единица измерения длины, равная 10^{-10} м (1 Å = 100 пм = 0,1 нм; 10 000 Å = 1 мкм).

Анализ тенденций развития наноизмерительных и нанотехнологических машин

Точное позиционирование на уровне нанометров стало одним из важнейших требований при разработке прецизионного технологического оборудования для прецизионного машиностроения.

В работе [4] (**2001 г.)** представлены результаты разработки комбинированной системы, построенной на известных принципах и включающей наружный (точность 10 мкм) и внутренний (точность 10 нм) контур системы позиционирования. В качестве наружного контура используется серводвигатель на основе шарико-винтовой пары и традиционного датчика обратной связи (угла поворота), а в качестве внутреннего – пьезопривод и лазерный интерферометр в качестве датчика обратной связи. Это стало возможным благодаря применению **абсолютного метода измерения положения** [5-7] (метода дисперсионной интерферометрии с использованием фемтосекундного импульсного лазера) вместо инкрементального метода.

Другим принципиальным новшеством является использование в комбинированной системе для устранения шумовых составляющих при движении специально разработанного цифрового фильтра Чебышева. Было установлено, что реализованный цифровой фильтр повышает точность позиционирования в три раза. Точность позиционирования была достигнута в пределах 10 нм при ходе 200 мм.

Однако следует отметить, что в данной работе решена задача высокоточного позиционирования по одной линейной координате и остается не ясным вопрос использования полученных результатов для создания систем точного движения по криволинейной траектории с использованием многокоординатного оборудования с многокоординатными интерполяторами.

Для решения этой задачи предложен принципиально другой подход в работе [8] **2004 г.**

Чтобы уйти от «слоённой» конструкции платформы, перемещающейся в плоскости по двум независимым координатам X, Y предложено использовать платформу, перемещающуюся в плоскости (X, Y, θ_Z) на аэростатических подшипниках и приводимой в движение с помощью четырёх двухфазных линейных двигателей в направлениях X и Y (рис. 1).

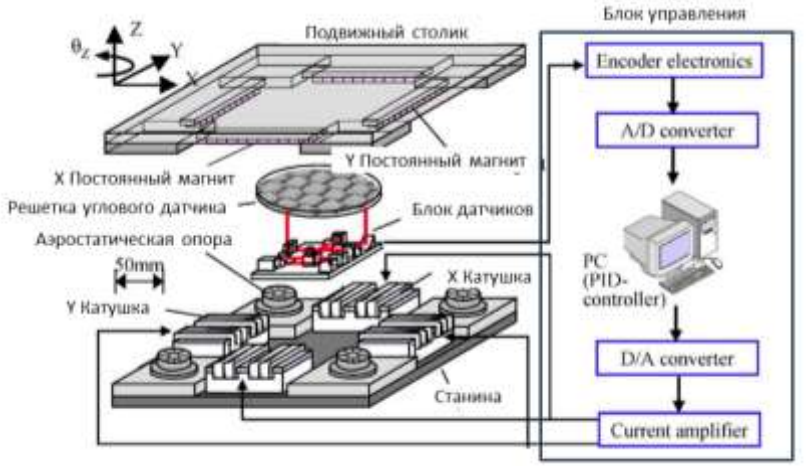


Рис. 1. Конструктивная схема устройства движения стола в плоскости.

Сенсорный блок поверхностного энкодера состоит из двух линейных и одного углового интерферометра (решетка углового датчика и блок датчиков).

Исследования подтвердили, что **разрешение энкодера** составляет **~ 20 нм** в направлениях X и Y и 0,2″ в направлении угла поворота θ вокруг оси Z. Поверхностный энкодер был интегрирован в прототип планарной платформы XY. **Ход платформы составляет 40 мм**. Эксперименты по позиционированию продемонстрировали, что платформа может управляться независимо в направлениях X и Y с точностью **200 нм** и **1″** по углу поворота θ вокруг оси Z. Выявлено, что для повышения точности позиционирования во всем рабочем диапазоне требуется провести процесс калибровки и компенсации. Также требуется разработать дополнительные системы измерения и управления движения платформы: тангаж (θ_X), качение (θ_Y).

2009 г. В работе [9] описана конструкция и результаты экспериментальных исследований машины для нанопозиционирования и наноизмерений NMM-1, разработанной Институтом измерения процессов и сенсорных технологий Технического университета Ильменау, Германия и изготовленной компанией SIOS Messtechnik GmbH, Германия. Машина реализует режим сканирования образца в диапазоне 25×25×5 мм с разрешением 0,1 нм. (рис.2). В ней реализовано активное управление наклоном платформы со сканируемым образцом, реализуемое системой из четырех z-приводов. Таким образом достигается точное плоскопараллельное движение во всем рабочем объеме NMM-1 и изначальная недостаточная точность механических направляющих для перемещения по осям x, y и z не влияет на общую точность машины, поскольку неизбежные отклонения компенсируются замкнутой системой управления (системой из четырех z-приводов). Погрешность сканирования составляет σ = 2,6 нм при использовании измерительной головки, разработанной фирмой NPL (Англия) [10,11].

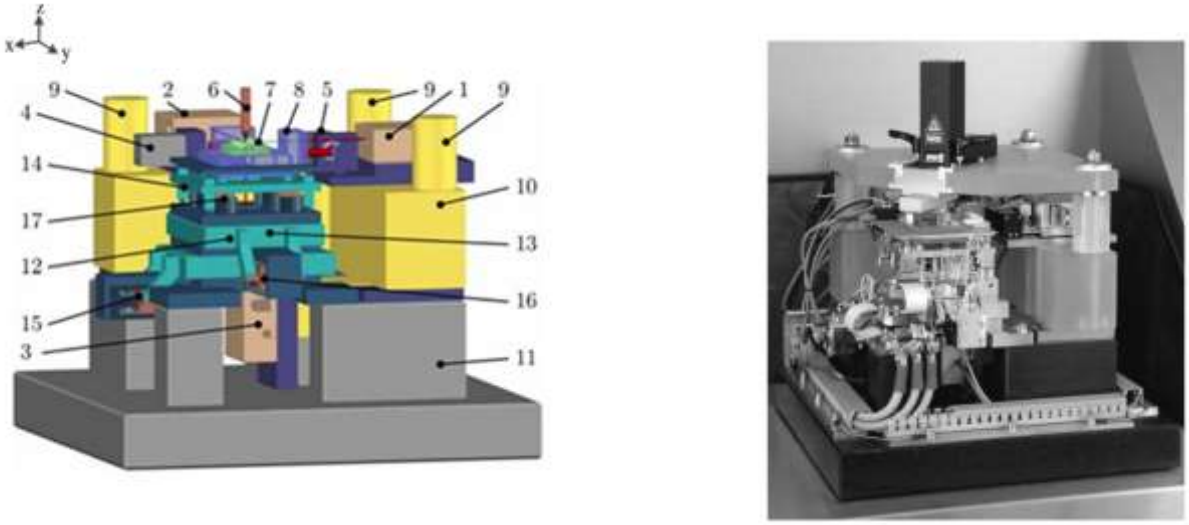


Рис. 2. Общий вид и компоновочная схема наномашины NMM-1: 1 - интерферометр X, 2 - интерферометр Y, 3 - интерферометр Z, 4 – датчик угла поворота платформы вокруг осей Y, Z (φ_y, φ_z), 5 - датчик угла поворота платформы вокруг осей X, Z (φ_x, φ_z), 6 измерительная головка, 7 – сканируемый объект, 8 – «угловое» зеркало (отражатель для интерферометров X, Y), 9 – колона из Zerodur, 10 рама из Zerodur для установки датчиков, 11 – станина для направляющих качения (12 – ось X, 13 – ось Y, 14 – ось Z,15 - привод X, 16 - привод Y, 17 - привод Z.

Следующим этапом развития рассматриваемого направления является разработка, описанная в работе [12] **2011 г.** Создана универсальная нанопозиционирующая и наноизмерительная машина NPMM-200 с рабочим объемом 200×200×25 мм и разрешением 0,02 нм. Общий вид и компоновочная схема наномашины NPMM-200 показана рис. 3.

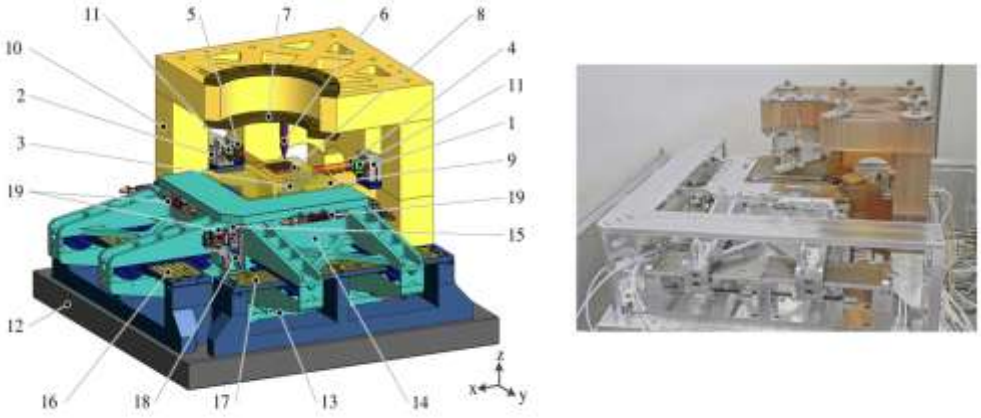


Рис. 3. Общий вид и компоновочная схема наномашины NPMM-200: 1 - интерферометр X, 2 - интерферометр Y, 3 - интерферометр Z, 4 – датчик угла поворота платформы вокруг осей Y, Z (φ_y, φ_z), 5 - датчик угла поворота платформы вокруг осей X, Z (φ_x, φ_z),, 6 измерительная головка, 7 – измерительная головка, 8 – сканируемый объект, 9 – зеркальная панель (отражатель для интерферометров), 10 рама из Zerodur для установки датчиков, 11 – датчики нуля наномашины, 12 – гранитная плита наномашины, 13 - роликовые направляющих качения (13– ось X, 14 – ось Y, 15 – ось Z), 16 - привод X, 17 - привод Y, 18 - привод Z и компенсаторы веса подвижных узлов наномашины [13].

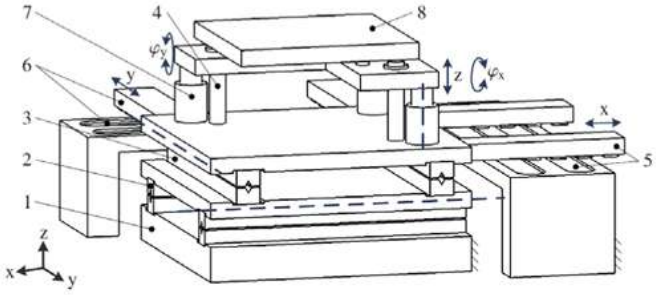


Рис. 4. Схема конструкции несущей системы с приводами наномашины NPMM-200: 1 – базовая плита из алюминиевого сплава, 2 – роликовые направляющие качения (2 – x, 3 – y, 4 – z), 5 двигатели (5 - x, 6 – y, 7 – z), 8 - зеркальная панель.

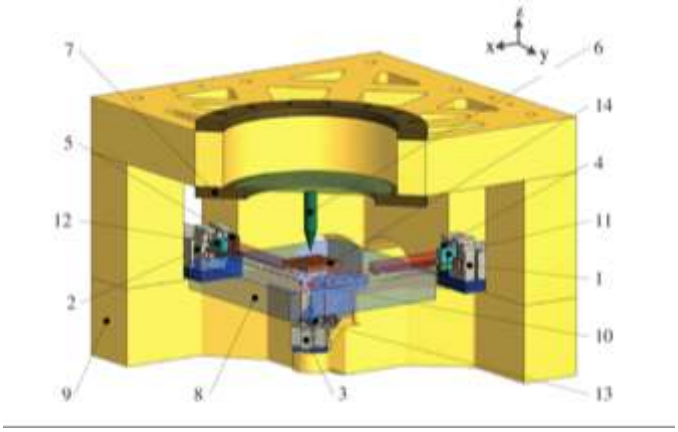


Рис. 5. Схема конструкции несущей метрологической системы с датчиками наномашины NPMM-200: 1 – интерферометр оси X, 2 - интерферометр оси Y, 3 – интерферометр оси Z, 4 – датчик угла φ_y и φ_z, 5 - датчик угла φ_x и φ_z, 6 – измерительная головка, 7 – присоединительная плата измерительной головки, 8 – зеркальная плата, 9 – метрологическая ферма из Zerodur, 10 – точка Abbe, 11 – датчик нуля для оси x, 12 - датчик нуля для оси y, 13 - датчик нуля для оси z, 14 – измеряемый или сканируемый объект.

В работе [14] отмечается, что угловые отклонения позиционируемой платформы в данной наномашине измеряются тремя дополнительными угловыми интерферометрами и корректируются двигательной системой в направлении Z. Таким образом в NPMM-200 используется шестиосевая система лазерных интерферометров с волоконной связью (рис. 6). В качестве обобщенных характеристик точности наномашины NPMM-200 можно указать: 1) рабочий орган или измерительная головка позиционируется в любой точке в пределах измерительного объема (200 мм × 200 мм × 25 мм) с повторяемостью 4 нм (k = 2), 2) рабочий орган наномашины в вертикальном направлении может перемещаться шагами в субнанометровом диапазоне. На рис. 7 показаны результаты позиционирования выполненных в вертикальном направлении Z вверх и вниз: а) шаг - 1 нм, б) - 80 пм. Шум на каждом плато в основном не превышает ±60 пм, а иногда менее ±30 пм. Стоит отметить, что позиционируемая платформа весит около 24 кг.

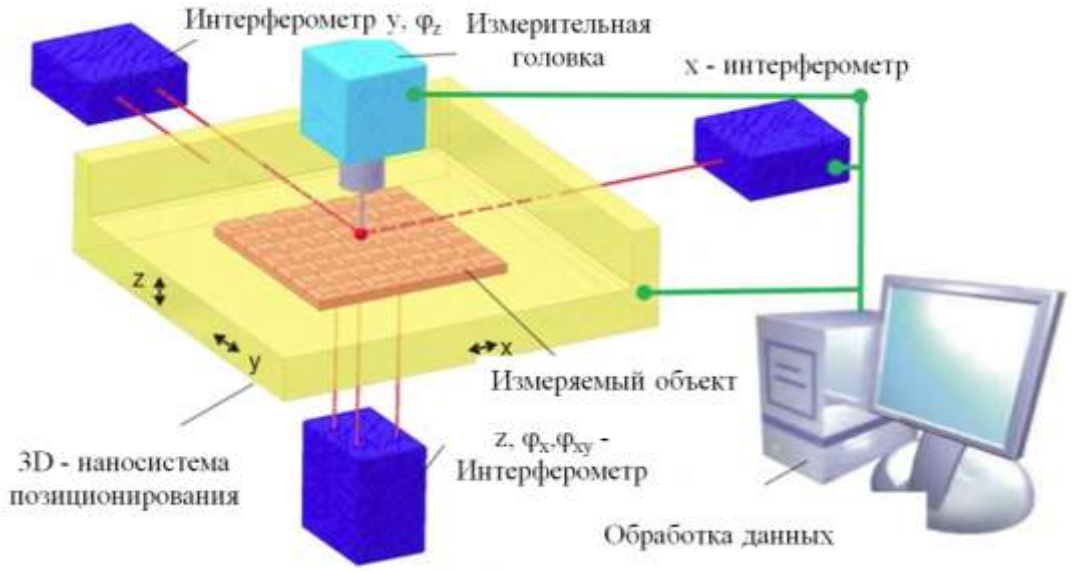


Рис. 6. Метрологическая схема измерений наномашины NPMM-200

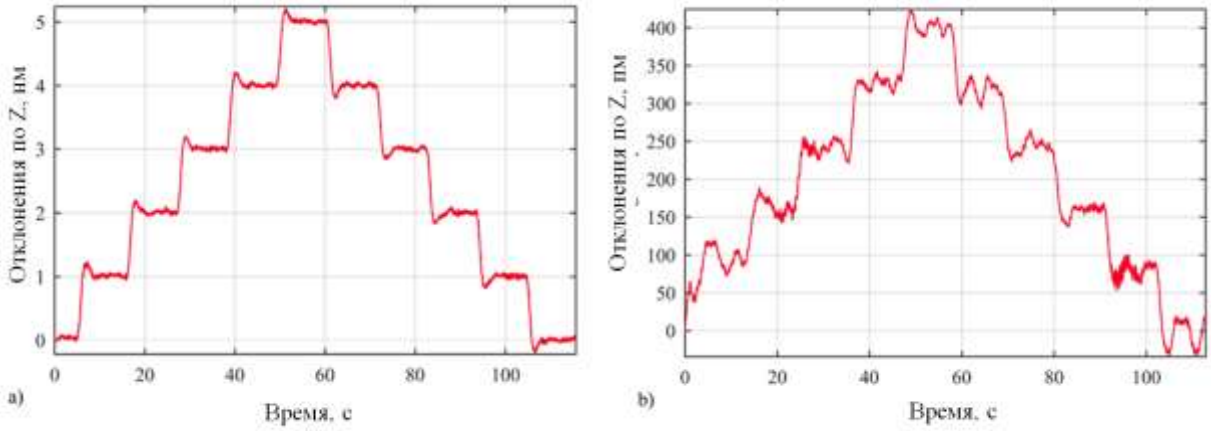


Рис. 7. Результаты перемещения рабочего органа наномашины NPMM-200 по оси Z: а) с шагом 1 нм, б) с шагом 80 пм.

Существует несколько стандартов высоты ступеней, специально предназначенных для калибровки сканирующих микроскопов. Сравнительный анализ наноступенчатых измерений на расстоянии от 7 нм стандарты высоты ступени в 1000 нм очень хорошо представлены в работе [15], по крайней мере, с погрешностями в 1 нм (k = 2). Для экспериментальных исследований наномашины NPMM-200 использовались специальные стандарты высоты ступеней, изготовленные из кварца в диапазоне 1-5 мм. Измерение высоты ступеней производилось с помощью лазерного датчика фокусировки [16], который в настоящее время также выпускается компанией SIOS Messtechnik GmbH на коммерческой основе.

В работе [17] **2011 г.** представлены результаты исследования планарной установки, которые предшествовали созданию наномашины NPMM-200.

В данной работе представлена децентрализованная схема управления планарной установки точного позиционирования. Отмечается, что для достижения оптимального времени измерения при увеличенных диапазонах перемещения необходимо динамическое позиционирование и измерение во время движения. В этом случае трение, создаваемое шарикоподшипниками, является основной проблемой при создании системы управления. Таким образом, точное моделирование трения и компенсация имеет решающее значение для динамического позиционирования с точностью до нанометра. Предлагаемый метод управления базируется на использовании пространства состояний на основе модели в сочетании с наблюдателем помех. При разработке контроллера используется модель упругопластического трения.

Исследования проведены на установке с рабочими перемещениями 200 х 200 мм **при сохранении принципа планарности.** Механическая конструкция представляет собой двойную Н-структуру (рамка в рамке). Это означает, что «внутренняя» ось расположена внутри «внешней» оси. Общий вид установки представлен на рис. 8.

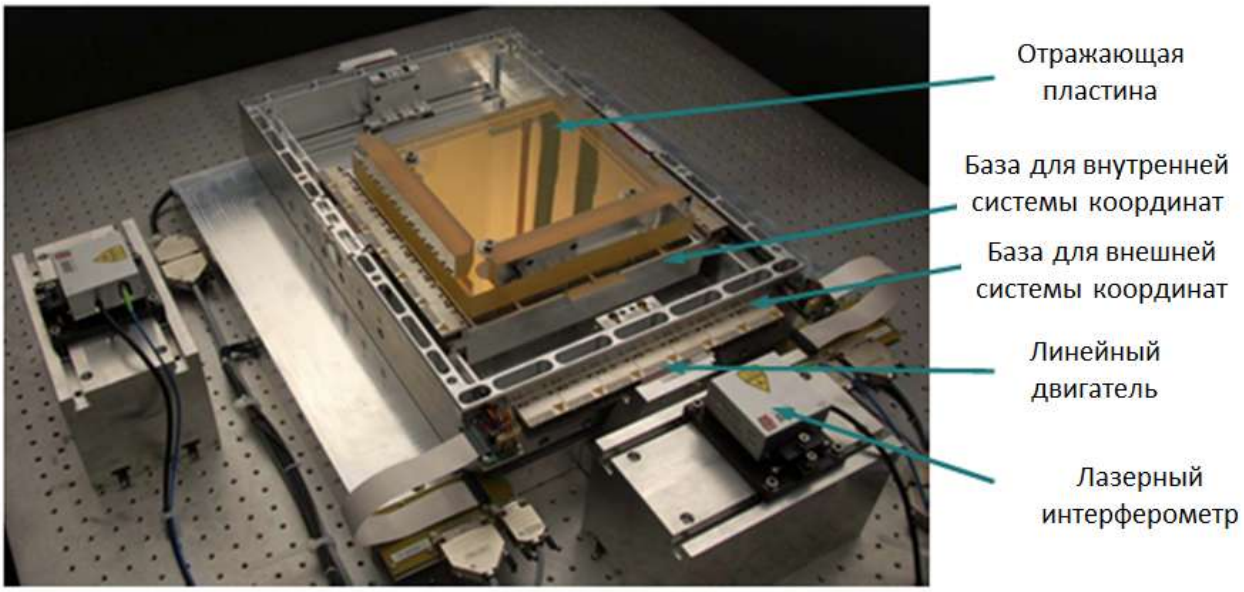


Рис. 8. Общий вид прецизионной планарной установки, работающей в плоскости XY.

Двигатели питаются от аналоговых усилителей собственной разработки. Коммутация двигателей осуществляется системой управления в соответствии с напряженностью магнитного поля, измеряемой встроенными датчиками Холла. Рабочий диапазон позиционирования отражающей зеркальной пластины, несущей измеряемый или сканируемый объект, составляет **200 х 200 мм.** Каждая ось поддерживается двумя линейными V-образными высокоточными направляющими качения. Положение пластины по каждой координате X и Y измеряется стабилизированными He-Ne-лазерными интерферометрами **с разрешением 0,1 нм** [18]. Высокоточные «зеркальные» отражатели установлены на пластине стола, изготовленного из материала Zerodur (стеклокерамики с коэффициентом теплового расширения, равным $0 \pm 0.007 \times 10^{-6}$ K^{-1} в диапазоне температур 0 ÷ 50 °C). Для сбора данных и управления используется модульная система реального времени dSpace в сочетании с Matlab/Simulink R. Система управления работает с частотой

дискретизации 10 кГц. Динамическим поведением усилителя и двигателя в данной работе пренебрегают, т. к. общая частота среза превышает 10 кГц. В этом случае, приложенная сила F(t) к столику со стороны линейного двигателя пропорциональна выходному сигналу усилителя, току i(t).

$$F(t) = k_A \cdot i(t)$$

Используется декартовая система координат, направляющие качения расположены перпендикулярно друг другу. Механическая конструкция представляет собой двойную H-структуру (рамка в рамке), поэтому движущая сила от приводов действует на высоте в близи центра тяжести подвижной платформы вдоль каждой оси. В связи с этим сделано предположение, что динамические системы вдоль оси X и оси Y моделируются, как отдельные системы.

$$F(t) = m \cdot \ddot{x}(t) + F_f(t).$$

Движущая сила используется для придания ускорения массе m и преодоления силы трения $F_f(t)$. Для представления силы трения используется модель упругопластического трения, которая была введена Дюпоном [19]. Эта модель основана на предположении, что поверхности двух «трущихся» объектов состоят из маленьких «щетинок», которые взаимодействуют друг с другом (рис. 9). «Щетинки» характеризуются коэффициентом жесткости σ_0 и коэффициентом демпфирования σ_1. Аналогичный подход использовался в работе [20].

В данной работе рассматриваются вопросы моделирования и управления при точном позиционировании столика в плоскости XY при наличии трения качения. Основой предлагаемой схемы управления является ПИ-регулятор. Для моделирования системы используется упругопластическая модель трения. Для проектирования регулятора была получена и использована упрощенная модель.

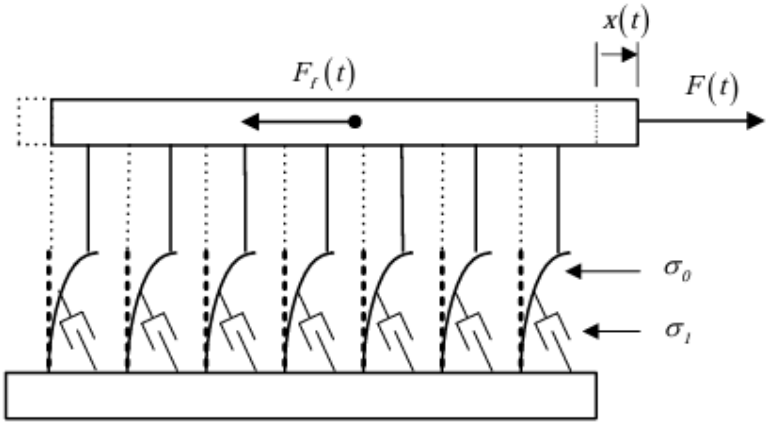


Рис. 9. Модель силы трения («щетинка»).

В экспериментальном исследовании предложенный подход, основанный на модели силы трения, сравнивается с ПИД-регулятором без учета трения. В качестве тестовых траекторий были выбраны синусоидальное движение, движение по прямой и круговое движение.

На рис. 10, а) показаны фактическое положение (синяя кривая x), расчётное положение (зелёная кривая x_{ref}) и отклонения в позиционировании (красная кривая) для случая, когда

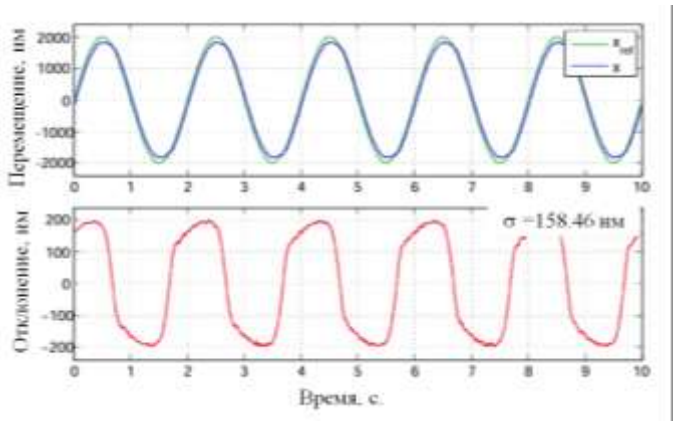
узел с трением не охвачен отрицательной обратной связью. Рассматривается ошибка отслеживания для синусоидального движения с амплитудой a = 2 мкм (2000 нм) и частотой: f = 0,5 Гц

$$x_{ref} = a \sin(2\pi ft).$$

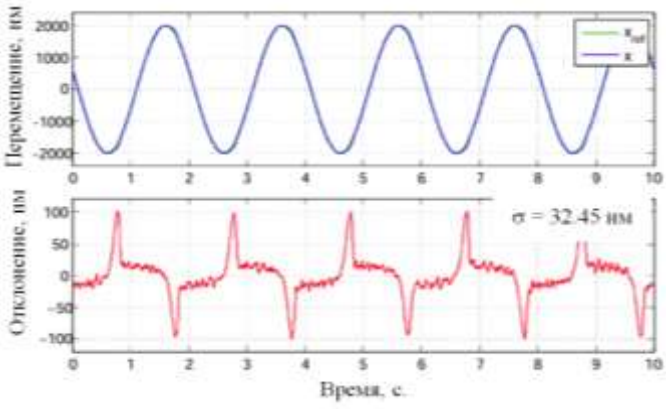
Максимальное отклонение составляет 200 нм, а среднеквадратичное отклонение (СКО) составляет σ = 158,64 нм. Напротив, на рис.12, б) показана ошибка отслеживания с регулятором в пространстве состояний (узел с трением охвачен отрицательной обратной связью и обычный PID-регулятор). Наблюдается явное улучшение, и СКО снижается до σ = 32,45 нм.

Однако всё ещё наблюдаются большие отклонения в точках реверса, где скорость равна нулю и система «застревает». Это можно объяснить тем, что в этот момент проявляется действие «упругого зазора».

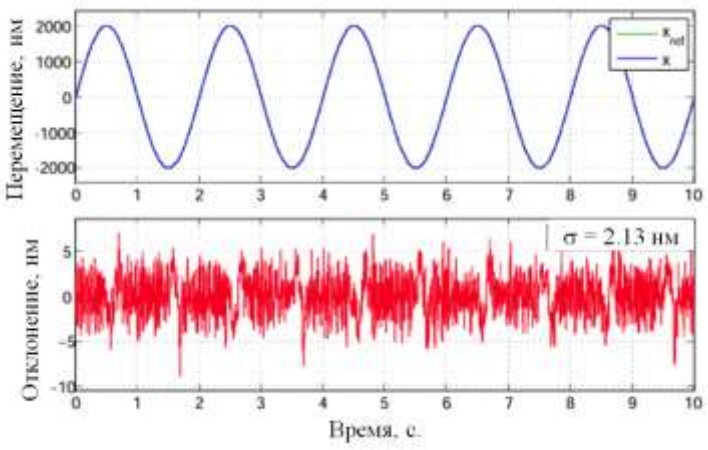
На рис. 10, в) показана ошибка отслеживания при использовании дополнительного наблюдателя возмущений. Видно, что фильтр Калмана способен компенсировать неучтенные эффекты. Предлагаемая комбинация контроллера пространства состояний и наблюдателя возмущений приводит к хорошим результатам отслеживания. Максимальная ошибка снижена до 8 нм, а среднеквадратичное отклонение (СКО) также минимизировано до σ = 2,13 нм.



а)



б)



в)

Рис. 10. Результаты экспериментального исследования движения платформы по окружности (приводятся сигналы по координате x).

В наномашине NFM-100 [21] используется идея планарной схемы rrr[3] и «прямого» привода [22]. На рис. 11 показан вид сбоку на установку. В качестве измерительного инструмента (прибора сравнения) установлена измерительная система на основе зонда. Эта АСМ-система использует активные микроконсольные датчики и имеет трёхмерный диапазон перемещения 10 мкм x 10 мкм x 5 мкм благодаря пьезоэлектрическому сканирующему устройству. Эти микроконсольные датчики для повышения чувствительности приводятся в наноколебания термомеханическим приводом. Этот привод состоит из различных слоёв с различными коэффициентами теплового расширения. Считывание отклонения кантилевера (измерительного наконечника) осуществляется с помощью моста Уитстона. Скорости сканирования до 50 мкм/с уже были продемонстрированы с помощью этой системы на основе зонда в [23].

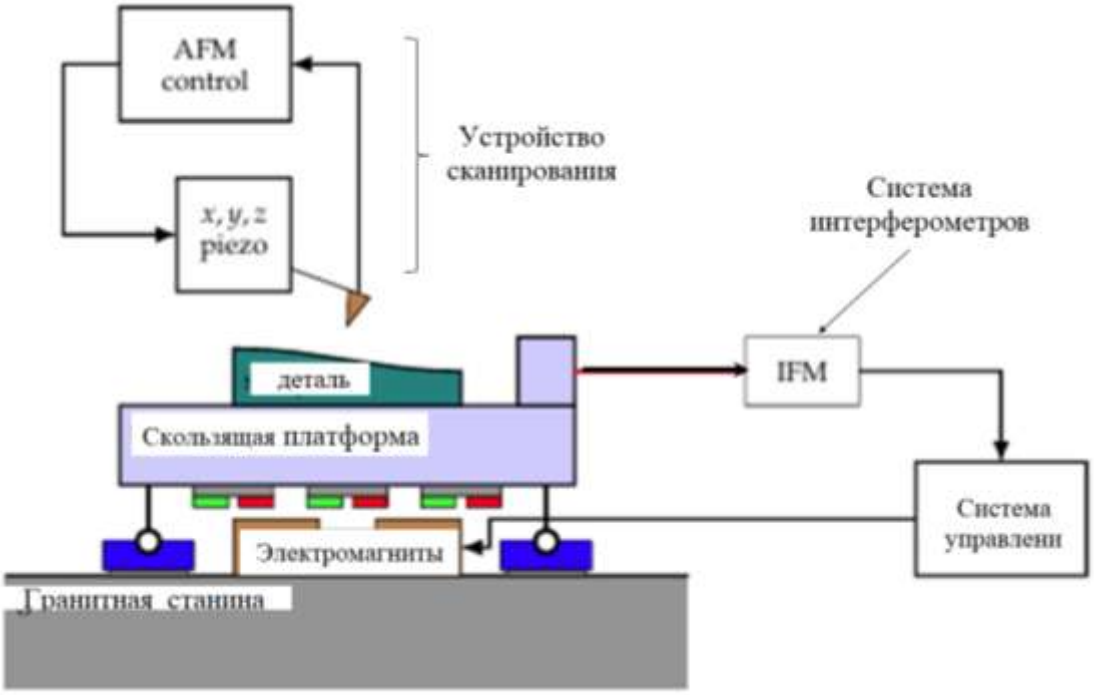


Рис. 11. Схема установки с устройством сканирования

Вся установка работает в климат-контролируемой и виброизолированной среде. Платформа скользит на трёх аэростатических подшипниках и её положение в плоскости измеряется дифференциальными интерферометрами (IFM). Системы измерения и приводы расположены в одной плоскости под углом 120 градусов друг к другу (рис. 11 и рис.12 [22]).

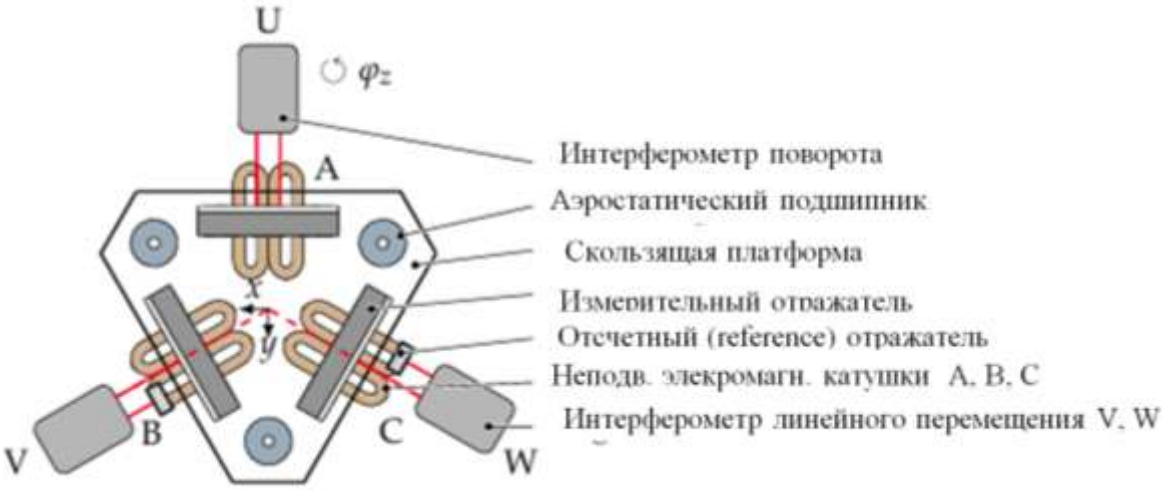


Рис. 12. Схема скользящей платформы наномашины NFM-100.

Аэростатические направляющие имеют «низкое» трение и «низкий» уровень вибрации во время движения [23-24].

Отсутствие «механического» контакта при таком типе направляющих позволяет исключить эффекты «прерывистого» скольжения. Это обеспечивает высокую повторяемость точности позиционирования [25].

Наномашина NFM-100 может быть оснащена различными инструментами и использоваться как технологическая наномашина, так и измерительная наномашина с применением сканирующего атомно-силового микроскопа.

Точность движения платформы по траектории окружность с радиусом 1 мм и окружной скоростью 10 мм/с. составляет (отклонение по радиусу) σ = 3,107 нм, а по углу φ_z σ = 354 нрад (нанорадиан). На рис. 13 представлена CAD модель наномашины NFM-100 со сканирующим атомно-силовым микроскопом.

Из рис. 11 и рис. 13 видно, что сканирующий атомно-силовой микроскоп и узел «скользящая платформа» размещены **раздельно** на гранитной станине. Это положительно сказывается на точности работы наномашины.

Следующим шагом в развитии этого направления является исследование влияния воздушных подшипников на «покачивания» скользящей платформы, и разработка системы управления движения по оси Z планарной наномашины в соответствии с [26]. Наномашина может быть доработана, чтобы обеспечить активное управление платформы в направлении Z и компенсировать её «покачивание», как это сделано в наномашине NPMM-200. Это достигается путем встраивания приводов в направлении Z в аэростатические опорные «подушки».

Интегрированная планарная система привода [26] с 6 степенями свободы представляет собой комбинацию 3D планарного двигателя для скользящей платформы по осям x, y и φ_z (исходная конструкция NPPS100, рис. 14) и системы из 3-х вертикальных приводов (z, φ_x и

φ_y). На рис. 15 представлен общий вид модифицированной установки NPPS100-6D, а на рис. 16 - отдельный вертикальный привод Z, встроенный в опору аэростатического подшипника.

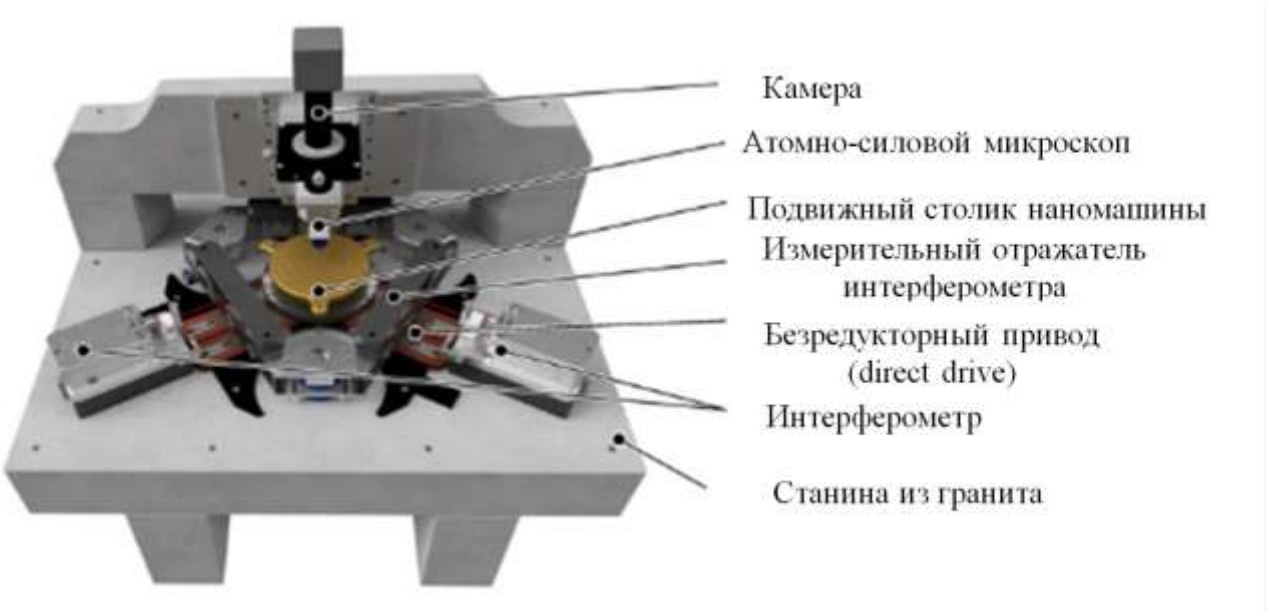


Рис. 13. CAD модель наномашины NFM-100 со сканирующим атомно-силовым микроскопом (АСМ).

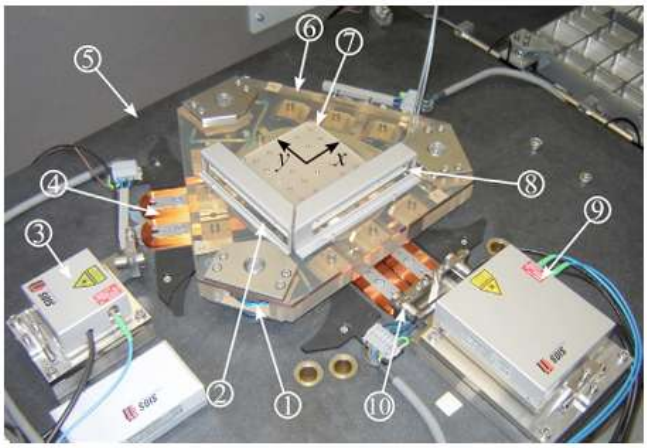


Рис. 14. Исходная конструкция NPPS100: 1 – аэростатический подшипник, 2 – отражатель интерферометра x, 3 - интерферометр x, 4 – обмотка (катушки) привода, 5 – гранитное основание, 6 – скользящая плита из zerodur, 7 – перемещаемый объект, 8 - отражатель интерферометра *y*, φ_z, 9 - интерферометр *y*, φ_z, 10 – ёмкостной датчик.

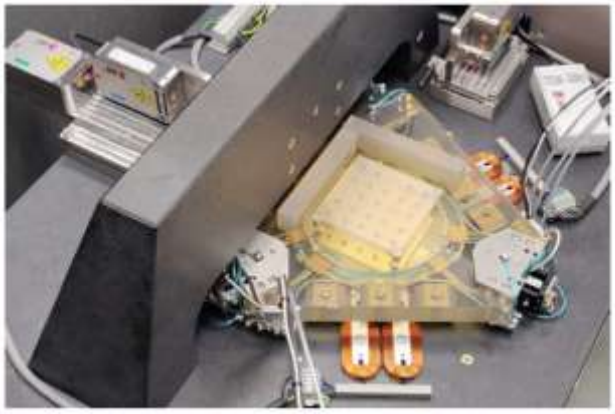


Рис. 15. Общий вид модифицированной установки NPPS100-6D: с 6D интерферометрической системой измерения и 3 двигателями LAU, установленными на аэростатические подшипники.



Рис. 16. Общий вид аэростатического подшипника с встроенным приводом Z.

Вертикальные приводы Z дополнительно реализуют пневматическую компенсацию веса скользящей платформы. Для управления по замкнутому контуру 6 D осуществляется измерение перемещений и углы наклона высокоточной многоканальной системой интерферометров с плоским зеркалом.

(2021 г.) В настоящее время исследования в области нанотехнологий ограничен работой в плоскости. Функционализация непланарных поверхностей (в оптике, например, асферы и поверхности «свободной» формы) с помощью наноструктур позволила бы добиться дальнейшего значительного технического прогресса [23].

Сложность любого процесса нанесения оттиска заключается в позиционировании и выравнивании штампа в направлении нормали к поверхности, на которую наносится оттиск. Возможности позиционирования по трем линейным координатам, которыми обладают NPM машины [8,9,22,23], является вполне достаточными для процесса нанесения оттиска на поверхности близкие к плоским. Для структурирования сильно «искривленных»

поверхностей с локальными наклонами до 45° необходимо наклонять сам штамп. Это возможно при использовании пяти/шести координатной нанотехнологической машины. На рис. 17 представлена схема пятикоординатной наномашины NMM-1 [23]. Здесь: 1 - Угловой зеркальный отражатель в цепях обратных связей приводов X, Y, Z, 2 - интерферометры X, Y, Z, 3 - «метрологическая» станина, 4 - гониометр поворотной оси ϕ, *5* поворотная ось θ, *6* датчики расстояния системы отсчета, *7* опорная полусфера, *8* рабочий инструмент («штамп»), *9* обрабатываемое изделие, *10* станина машины.

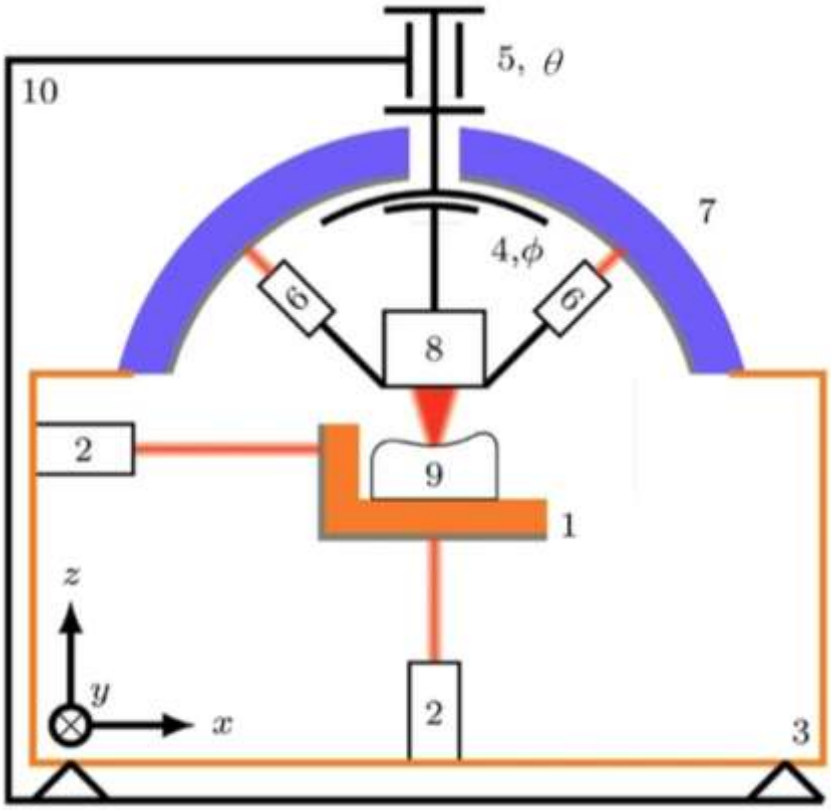


Рис. 17. Схема пятикоординатной наномашины NMM-1

Работы в этом направлении продолжают идти в настоящее время: 1) Фундаментальные исследования в области проектирования пятикоординатных наномашин для измерений и технологических операций [27], 2) экспериментальные исследования точностных возможностей 6-ти координатной наномашины NPS6D100—A6D с разрешением < 10 нм с рабочим объёмом ∅100 мм × 10 мм [28]. Будущие разработки предполагается сосредоточить на изучении (in situ) в конкретных условиях проводимых калибровочных операций и интегрированного взаимодействия с инструментальными зондами для расширения функциональности в области нанотехнологий.

Заключение. Наномашины NMM-1, NPMM-200 и NFM-100 представляют значительный прогресс в развитии сверхточных измерений и работ с объектами в нанометровом диапазоне. Это оборудование составляет основу для проведения функционализации поверхностей и материала с помощью создания новых наноструктур как поверхностного, так и объемного слоя материала. Это является огромным потенциалом для создания продуктов и изделий с

ранее неизвестными свойствами и является предметом текущих международных исследовательских инициатив**.**

Выводы. Для выполнения процесса нанопозиционирования с дискретностью нм или A˚ в машинах в рабочем пространстве ∅ 300 мм на Z = 50 мм, представленных в работах [3-5], применены новые подходы:

1. В системе позиционирования, работающей в плоскости**, осуществлен переход от конструкции «слоённого пирога»,** где два ползуна установлены один на другом на направляющих качения (это приводит к проблеме сильного нелинейного трения, особенно в нанометровом диапазоне), **к одному ползуну (планарная конструкция)**, установленному на воздушных подшипниках и имеющему три степени свободы.
2. В системе приводов используется принцип **"direct drive".**
3. В измерительной системе используются **лазерные интерферометрические датчики** в сочетании с применением в конструкции НС материала **Zerodur** (отечественный аналог - **Ситалл-ЛГ**).
4. Применение системы регулирования с отрицательной обратной связью по углу поворота платформы вокруг управляемых координат X, Y.
5. На базе основных наномашин NMM-1, NPMM-200 и NFM-100 ведутся разработки многокоординатных наномашин, позволяющих устанавливать рабочий инструмент («штамп») по нормали к поверхности образца.
6. Новые разработки в создании эталонов настройки и калибровки наномашин.
7. Использование достижений в теоретических и экспериментальных исследованиях в области управления высокодинамичными подвижными планарными платформами.

Список литературы

1. Fritze M. (2021) Post-Moore: prospects for novel patterning of low volume ICs. In: Panning EM, Liddle JA (eds) Novel patterning technologies 2021. Vol. 11610. International society for optics and photonics. SPIE, Bellingham. https:// doi. org/ 10. 1117/ 12. 25932 29.
2. Amthor A., Zschaeck S. and Ament C. High precision position control using an adaptive friction compensation approach, Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 55, no. 1, P. 274– 278, 2010. [11]
3. Moore G. E. (2006). Cramming more components onto integrated circuits, Reprinted from Electronics, volume 38, number 8, April 19, 1965, P.114 ff. In: IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter 11.3, pp. 33–35. https:// doi. org/ 10. 1109/N- SSC. 2006. 47858 60.
4. Pahk H.J. et al. Ultra precision positioning system for servo motor piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation / International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) P. 51- 63.
5. Joo K.-N. and Kim S.-W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser / OPTICS EXPRESS 595 / 26 June 2006 / Vol. 14, No. 13.
6. Jin J., and Kim S.-W. Precision Dimensional Metrology Based on a Femtosecond Pulse Laser, published: 01 February 2010, From the Edited Volume Advances in Solid State Lasers Development and Applications Edited by Mikhail Grishin https://www.intechopen.com/chapters/8408

7. Wu H., Zhang F., Liu T., Meng F., Li J., and Qu X. Absolute distance measurement by chirped pulse interferometry using a femtosecond pulse laser / **Optics Express,** Vol. 23, Issue 24, P. 31582-31593, (2015), https://doi.org/10.1364/OE.23.031582.
8. Gao W., Dejima S., Yanai H., Katakura K., Kiyono S., Tomita Y. A surface motor-driven planar motion stage integrated with an X, Y, θ_Z surface encoder for precision positioning. / Precision Eng, 2004, 28(3), P. 329–337.
9. Jäger G., Manske E., Hausotte T., Büchner H.-J. The Metrological Basis and Operation of Nanopositioning and Nanomeasuring Machine NMM-1 / tm - Technisches Messen, Volume 76, Issue 5, P. 227-234.
10. Weckenmann A., Peggs G. N., Hoffmann J. Probing Systems for Dimensional Micro and Nano Metrology / 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments ISMTII, Huddersfield, UK, P. 199–206, 2006.
11. Peggs G. N., Lewis A. J.; Oldfield S. Design for a compact highaccuracy CMM / Annuals of CIRP 48(1), 417–420 (1999).
12. Jäger G., Manske E., Hausotte T., Müller A. and Balzer F. Nanopositioning and nanomeasuring machine NPMM-200 - a new powerful tool for large-range micro- and nanotechnology / Surf. Topogr.: Metrol. Prop.4(2016)034004
13. Balzer F. G. 2015. Entwicklung und Untersuchungen zur 3D Nanopositioniertechnik in großen Bewegungs bereichen. PhD Thesis TU Ilmenau
14. Manske E., Fröhlich T., Füßl R., Ortlepp I., Mastylo R., Blumröder U., Dontsov D., Kühnel M. and Köchert P. Progress of nanopositioning and nanomeasuring machines for cross-scale measurement with sub-nanometre precision / Meas. Sci. Technol. 31 (2020) Measurement Science and Technology, Volume 31, Number 8 (8 p.)
15. Danzebrink H. U., Koenders L., Picotto G. B., Lassila A., Wang S. H. and Klapetek P. 2010. Final report on EUROMET. L-S15.a (EUROMET Project 925), intercomparison on step height standards and 1D gratings / Metrologia Volume 47, Number 1A.
16. Mastylo R., Dontsov D., Manske E. and Jager G. (2005). A focus sensor for an application in a nanopositioning and nanomeasuring machine / Proc. SPIE 5856 238–44
17. Zschaeck S., Amthor A., Ament Ch. Decentralized High Precision Motion Control for Nanopositioning and Nanomeasuring Machines / IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Conference Paper · November 2011 DOI: 10.1109/IECON.2011.6119369.
18. SIOS Meβtechnik GmbH. Miniature plane-mirror interferometer. [Online]. Available: http://www.sios.de
19. Dupont P., Hayward V., Armstrong B. and Altpeter F., “Single state elastoplastic friction models,” Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 47, no. 5, P. 787–792, May 2002.
20. Серков Н.А., Пась О.В. Исследование влияния внутреннего трения на траекторию движения «точки» на ленте при возбуждении гармонических колебаний (стенд «Аллигатор 2м») // «Вестник научно-технического развития». - 2024. - № 1(172). - С. 29-40. [Электронный ресурс] URL: http://www.vntr.ru.
21. Stauffenberg J. et al. Measurement Precision of a Planar Nanopositioning Machine with a Range of Motion of Ø100 mm. Appl. Sci. 2022, 12, 7843. https //doi.org/ 10.3390/ app12157843.

22. Ortlepp I., Stauffenberg J., Manske E. Processing and Analysis of Long-Range Scans with an Atomic Force Microscope (AFM) in Combination with Nanopositioning and Nanomeasuring Technology for Defect Detection and Quality Control / Sensors 2021, 21, 5862. https:// doi.org/10.3390/s21175862
23. Ortlepp I. et al. Tip and Laser based 3D Nanofabrication in Extended Macroscopic Working Area // Nanomanufacturing and Metrology (2021) 4:132–148 https://link.springer.com/article/10.1007/s41871-021-00110-w.
24. Hesse S., Schäffel C., Mohr H.U., Katzschmann M., Büchner H.J. Design and performance evaluation of an interferometric controlled planar nanopositioning system. Meas. Sci. Technol. 2012, 23, 074011.
25. Stauffenberg J., Ortlepp I., Blumröde U., Dontsov D., Schäffel C., Holz M., Rangelow I.W., Manske E. Investigations on the positioning accuracy of the Nano Fabrication Machine (NFM-100). tm-Tech. Mess. 2021, 88, 581–589.
26. Gorges S., Hesse S., Schaeffel C., Ortlepp I., Manske E., Langlotz E., Dontsov D. (2019) Integrated Planar 6-DOF Nanopositioning System. IFAC-Papers Online, Volume 52, 313–318. (2020).
27. Schienbein R., Fern F., Theska R., Supreeti S., Füßl R., Manske E. Fundamental Investigations in the Design of Five-Axis Nanopositioning Machines for Measurement and Fabrication Purposes / Nanomanufacturing and Metrology, 2021, volume 4, pages 156-164.
28. Hesse S., Huaman A., Katzschmann M. and Herzog L. NPS6D100—A6D Nanopositioning System with Sub-10 nm Performance in a 100 mm ×10mmWorkspace / Actuators 2025, 14, 361. https:// doi.org/10.3390/act14080361.

Дата поступления: 28 октября 2025 г.