Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук»

На правах рукописи

Пичахчи Степан Витальевич

# Аппаратно-программные средства повышения быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии

Специальность 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор физико-математических наук
Голубок Александр Олегович

Санкт-Петербург
2026

# Оглавление

Введение ... 3
Актуальность темы ... 3
История развития и эволюция методов СЗМ ... 4
Цель и задачи работы ... 6
Глава 1. Аппаратно-программные средства СЗМ (Литературный обзор) ... 8
1.1. Система сближения зонда с образцом ... 8
1.2. Система сканирования ... 9
1.3. Система управления, сбора и обработки данных ... 14
1.4. Датчики взаимодействия зонда с образцом (зондовые датчики) ... 16
1.5. Проблема быстродействия СЗМ и метод СИПМ в режиме «hopping» ... 20
1.6. Пьезоэффект, пьезоэлектрический резонатор и эквивалентная схема Баттерворта–Ван Дайка ... 25
Глава 2. Инерциальный шаговый пьезоэлектрический привод ... 30
2.1. Принцип работы и конструкция инерциального пьезопривода ... 31
2.2. Цифровая модель инерциального пьезопривода ... 36
2.3. Экспериментальные исследования инерциального пьезопривода, сравнение с модельными расчетами ... 40
2.4. Выводы ... 46
Глава 3. Система сканирования с динамическим демпфированием колебаний. ... 48
3.1. Принцип работы и конструкция сбалансированного сканера ... 48
3.2. Цифровая модель сбалансированного сканера ... 49
3.3. Экспериментальные исследования разбалансированного и сбалансированного сканеров, сравнение экспериментальных результатов с модельными расчетами . 54
3.4. Выводы ... 57
Глава 4. Пьезорезонансный датчик силового взаимодействия совместимый с методом СИПМ ... 58
4.1. Принцип работы и конструкция пьезорезонансного зондового датчика камертонного типа ... 59
4.2 Модель пьезорезонансного зондового датчика силового взаимодействия на основе электромеханического камертона с двумя пьезотрубками ... 60
4.3. Экспериментальные исследования пьезорезонансного зондового датчика, сравнение экспериментальных и расчетных данных ... 63
4.4 Выводы ... 70
Глава 5. Аппаратно-программные решения, увеличивающие скорость сканирования в СИПМ ... 71
5.1. Алгоритм с оптимизацией высоты отвода зонда от поверхности образца в «hopping» моде СИПМ ... 71
5.2. Алгоритм сканирования с аппаратным прерыванием ... 74
5.3. Аппаратная поддержка алгоритмов, обеспечивающих уменьшение времени измерений в СИПМ ... 79
5.4 Результаты применения предложенных решений, увеличивающих быстродействие в СИПМ ... 85
5.5. Выводы ... 94
Заключение ... 95
Список литературы ... 96

# Введение

## Актуальность темы

Современный этап развития науки и техники характеризуется устойчивым трендом к миниатюризации функциональных элементов технических систем и переходу к управлению свойствами материалов на атомарно-молекулярном уровне. Нанотехнологии и нанодиагностика стали ключевыми драйверами прогресса в микроэлектронике, фотонике, материаловедении, фармакологии и, в особенности, в молекулярной и клеточной биологии. Создание новых поколений материалов с программируемыми свойствами, разработка высокоэффективных лекарственных препаратов адресной доставки, конструирование квантовых вычислительных систем требуют инструментальных средств, способных осуществлять визуализацию, характеризацию и контролируемую модификацию (манипуляцию) объектов с нанометровым и субнанометровым пространственным разрешением.

В арсенале современного исследователя представлен широкий спектр методов микроскопии и спектроскопии высокого разрешения. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) среди них занимает одно из наиболее важных мест. СЗМ объединяет целое семейство инструментальных методик, основанных на детектировании локального физико-химического взаимодействия между острием миниатюрного зонда и поверхностью исследуемого образца при их взаимном прецизионном позиционировании. В отличие от традиционной световой и электронной микроскопии, СЗМ позволяет получать не только топографическую информацию о рельефе поверхности с атомарным разрешением, но и картировать распределение широкого спектра физических свойств: механических (модуль упругости, адгезия, жёсткость), электрических (потенциал, проводимость, ёмкость), магнитных, тепловых и химических. Основными методами СЗМ можно считать сканирующую туннельную микроскопию, силовую микроскопию (атомно-силовую, фрикционную, магнитную, электростатическую), ближнепольную (апертурную и безапертурную), ион-проводящую.

Уникальной особенностью СЗМ, принципиально выделяющей её среди прочих аналитических методов, является способность работать с образцами в условиях, максимально приближенных к нативным, в том числе в жидких средах, что открывает беспрецедентные возможности для неинвазивного исследования биологических объектов: от единичных биомакромолекул до живых клеток и тканей в естественных физиологических условиях. Однако, именно эти, наиболее биологически релевантные методики СЗМ демонстрируют и наименьшее быстродействие, что становится критическим ограничением при изучении быстропротекающих динамических процессов, скрининговых исследованиях и рутинном лабораторном анализе.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы определяется насущной потребностью современного научного приборостроения в разработке аппаратно-программных средств, позволяющих кардинально повысить скорость сканирования в зондовой микроскопии при сохранении, а в ряде случаев и при

повышении, качества и информативности получаемых изображений. Особую остроту эта проблема приобретает для метода сканирующей ион-проводящей микроскопии (СИПМ), являющегося одним из наиболее деликатных и перспективных, но одновременно и наиболее медленных методов СЗМ для визуализации живых систем.

## История развития и эволюция методов СЗМ

Точкой отсчета эры сканирующей зондовой микроскопии принято считать создание в 1981–1982 годах сотрудниками исследовательской лаборатории IBM в Цюрихе (Швейцария) Гердом Биннигом и Генрихом Рорером сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) [1]. Принцип работы этого революционного прибора основывался на квантовом туннельном эффекте: при сближении острого металлического зонда с проводящей поверхностью на расстояние порядка нескольких ангстрем, между ними под действием приложенного напряжения начинает протекать туннельный ток, величина которого экспоненциально зависит от этого расстояния. Регистрируя этот ток при сканировании зонда над поверхностью, исследователи смогли напрямую, в реальном пространстве, наблюдать отдельные атомы и их упорядоченные структуры на поверхности кристаллов. Фундаментальная значимость этого достижения для всей последующей нанотехнологической эпохи была отмечена присуждением Биннигу и Рореру Нобелевской премии по физике в 1986 году [2].

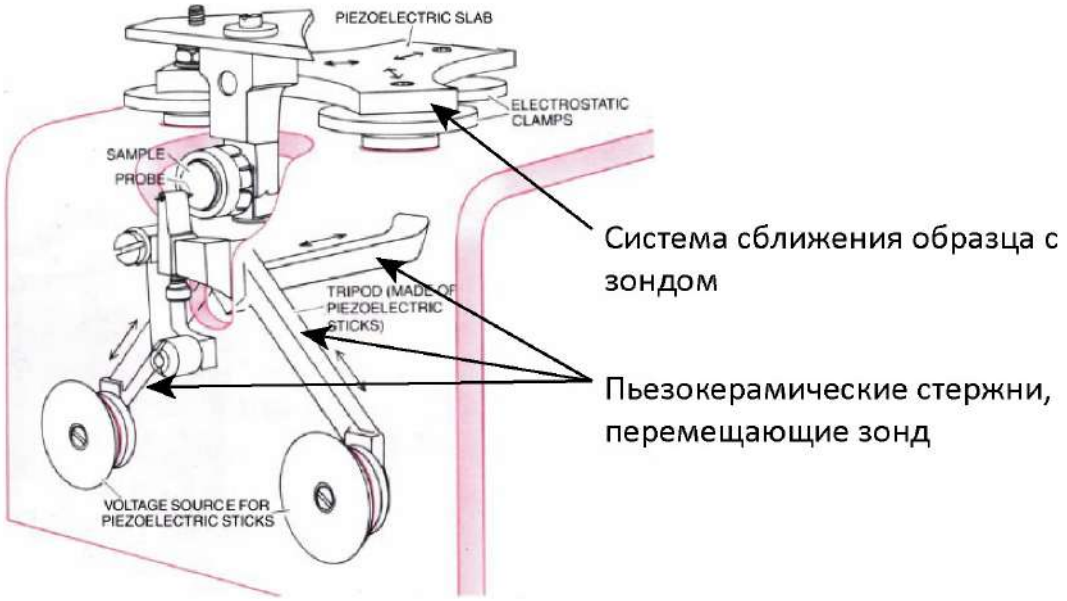



Рисунок 1. Конструкция СТМ Герда Биннига и Генриха Рорера [3]

Однако СТМ, обладая беспрецедентным пространственным разрешением, имел фундаментальное физическое ограничение, сдерживающее его применение: туннельный ток может протекать только между проводящими электродами, что делало невозможным исследование диэлектрических материалов, составляющих подавляющее большинство объектов живой и неживой природы. Это ограничение было блестяще преодолено уже через несколько лет: в 1986 году Г. Бинниг, К. Куэйт и К. Гербер опубликовали работу, в которой был описан принципиально новый прибор — атомно-силовой микроскоп (АСМ) [4]. В основе АСМ лежала регистрация

сил межатомного взаимодействия, возникающих между атомами на острие зонда и атомами поверхности образца. Это открытие радикально расширило область применения СЗМ, сделав возможным исследование с нанометровым разрешением практически любых материалов — диэлектриков, полупроводников, полимеров, биологических макромолекул и клеток.

Изобретение СТМ и АСМ инициировало экспоненциальный рост числа новых методик и модификаций СЗМ. К настоящему времени семейство СЗМ насчитывает несколько десятков разновидностей. Для систематизации этого многообразия общепринятой является классификация по двум основным признакам [5].

Первый классификационный признак — тип регистрируемого взаимодействия, лежащего в основе формирования сигнала изображения. По этому признаку методы СЗМ делятся на:

- Сканирующую туннельную микроскопию (СТМ), основанную на регистрации туннельного тока между зондом и образцом;
- Атомно-силовую микроскопию (АСМ), использующую Ван-дер-Ваальсовы, электростатические и химические силы для формирования изображения рельефа и картирования локальных механических свойств;
- Магнитно-силовую микроскопию (МСМ), позволяющую визуализировать распределение магнитных полей рассеяния над поверхностью образца;
- Микроскопию электростатических сил (МЭС), регистрирующую градиенты электростатического поля и позволяющую картировать распределение поверхностного потенциала и заряда;
- Сканирующую ион-проводящую микроскопию (СИПМ), в которой в качестве сигнала взаимодействия используется ионный ток, протекающий через наноразмерное отверстие в заполненном электролитом капилляре при его приближении к исследуемой поверхности в жидкой среде;
- Сканирующую оптическую микроскопию ближнего поля (апертурную и безапертурную), в которой регистрируется взаимодействие фотонов с исследуемой поверхностью в эванесцентной зоне (в области ближнего поля) с пространственным разрешением, преодолевающим дифракционный предел, характерный для традиционной оптической микроскопии.

Второй классификационный признак — конструктивные и методические особенности реализации, включающие геометрию и материал зонда, способ детектирования его отклонения, режим сканирования (контактный, полуконтактный/прерывистый, бесконтактный, динамический), а также архитектуру системы управления и позиционирования. Именно этот признак указывает на широкое разнообразие инструментальных реализаций, адаптированных под конкретные исследовательские задачи

# Цель и задачи работы

Непрерывное совершенствование методов СЗМ на протяжении последних четырех десятилетий позволило достичь впечатляющих результатов в области пространственного разрешения, чувствительности и многофункциональности. Однако, несмотря на все успехи, проблема производительности, т.е. скорости получения изображений и объёма регистрируемых данных в единицу времени, остается одним из главных вызовов для современных зондовых микроскопов. Традиционные СЗМ остаются относительно медленными приборами, время формирования одного полного изображения (кадра) может составлять от десятков минут до нескольких часов, что резко ограничивает их применимость для наблюдения динамических процессов в реальном времени, статистически значимого анализа и скрининговых измерений.

Это фундаментальное ограничение обусловлено комплексом взаимосвязанных физических факторов: конечными резонансными частотами электромеханических сканеров, временем отклика системы обратной связи, необходимостью обеспечения безопасных режимов сближения и отвода зонда во избежание повреждения образца и износа зонда, а также ограничениями, накладываемыми системами сбора и обработки данных. В ряде методик, таких как сканирующая микроскопия ионной проводимости в режиме «прыжков» (hopping mode), время сканирования дополнительно многократно увеличивается из-за необходимости осуществления вертикальных возвратно-поступательных движений зонда в каждой точке изображения.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка и создание аппаратно-программных средств сканирующей зондовой микроскопии, направленных на кардинальное повышение быстродействия метода сканирующей микроскопии ионной проводимости при сохранении его ключевых метрологических характеристик — пространственного разрешения, чувствительности, воспроизводимости и неинвазивности по отношению к исследуемым биологическим объектам.

Для достижения поставленной цели в работе последовательно решаются следующие задачи:

1. Проведение анализа литературных данных по современному состоянию аппаратно-программных средств СЗМ.
2. Моделирование и экспериментальное исследование системы сближения зонда с образцом на базе пьезоинерциального привода с целью выявления параметров, оказывающих влияние на точность перемещения и стабильность работы.
3. Моделирование и экспериментальное исследование системы сканирования СЗМ. Улучшение конструкции сканера по результатам моделирования.
4. Моделирование и экспериментальное исследование пьезорезонансного камертонного датчика ССМ с вольфрамовой иглой. Поиск более эффективных параметров работы датчика.

5. Разработка адаптивного алгоритма управления процессом сканирования для hopping моды СИПМ, с целью минимизации траектории движения зонда в процессе сканирования и времени измерения в каждой точке без потери качества и риска повреждения зонда или образца.
6. Аппаратная реализация разработанного алгоритма на базе современной электронной компонентной базы и создание экспериментальной установки.
7. Экспериментальная апробация и верификация разработанных аппаратно-программных средств на эталонных и реальных биологических образцах, с количественной оценкой достигнутого повышения быстродействия и качества получаемых СЗМ-изображений.
8. Анализ и интерпретация полученных результатов, формулировка практических рекомендаций по применению разработанных средств в задачах нанодиагностики биологических объектов.

# Глава 1. Аппаратно-программные средства СЗМ (Литературный обзор)

Настоящая глава посвящена обзору и анализу современного состояния ключевых аппаратных и программных компонентов сканирующих зондовых микроскопов, определяющих их функциональные возможности, точность измерений и, что наиболее важно в контексте данной работы, скорость сканирования, т.е. производительность. Рассматриваются основные подсистемы: система сканирования, система сближения зонда с образцом, система управления, сбора и обработки данных, а также зондовые датчики взаимодействия. Заключительный раздел главы посвящен подробному анализу проблемы быстродействия СЗМ и её специфике применительно к методу сканирующей микроскопии ионной проводимости.

## 1.1. Система сближения зонда с образцом

Процедура первоначального сближения зонда с поверхностью образца является одним из наиболее критичных и ответственных этапов в работе любого СЗМ. Основная задача системы сближения — обеспечить плавное, контролируемое и, главное, безопасное уменьшение расстояния между острием зонда и поверхностью образца от макроскопического (несколько миллиметров) до установления рабочего взаимодействия, которое в большинстве методов СЗМ возникает на расстояниях порядка единиц-долей нанометра. Любая ошибка на этом этапе приводит к необратимому повреждению острия зонда, а в ряде случаев и к разрушению участка поверхности образца.

Процесс сближения реализуется, как правило, в два последовательных этапа: грубое сближение и точный подвод. Для обеспечения грубого сближения, требующего перемещений в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, в СЗМ используются специализированные типы электромеханических двигателей, способные сочетать большой рабочий ход с нанометровым разрешением шага.

Традиционным решением является применение шаговых электродвигателей с прецизионными механическими редукторами (винтовыми, червячными или рычажными передачами), позволяющими трансформировать вращательное движение ротора в поступательное перемещение зонда или образца с субмикронной дискретностью. Однако механические редукторы вносят люфты, обладают ограниченным ресурсом и являются источниками дополнительных вибраций, что ограничивает их применение в высокоразрешающих СЗМ.

Также в ряде случаев в современном зондовом приборостроении используется пьезоинерционные двигатели, принцип действия которых основан на эффекте «slip-stick» (проскальзывания-прилипания) [6…8]. В типичной конструкции такой двигатель состоит из пьезоэлектрического элемента, один конец которого закреплен на неподвижном основании, а другой контактирует с подвижной инерционной массой (держателем образца или зонда). На пьезоэлемент подается последовательность асимметричных импульсов напряжения: фаза медленного нарастания напряжения вызывает плавное перемещение инерционной массы вместе с удлиняющимся

пьезоэлементом за счёт силы трения покоя, тогда как фаза быстрого спада напряжения приводит к резкому сокращению пьезоэлемента, при котором перемещающаяся с ускорением масса, вследствие инерционности, проскальзывает, оставаясь практически на месте. Многократное повторение таких импульсов обеспечивает направленное шаговое перемещение с величиной единичного шага от десятков нанометров до единиц микрометров при общем диапазоне хода в несколько миллиметров [8].

Пьезоинерционные двигатели компактны, не содержат трущихся механических пар в традиционном понимании, совместимы с вакуумом и криогенными температурами, а также позволяют реализовывать функции и грубого, и точного позиционирования в едином узле. Современной тенденцией является создание интегрированных пьезопакетов, в которых один многослойный пьезоэлемент одновременно выполняет функции исполнительного элемента системы точного позиционирования Z-сканера и движителя для грубого сближения. Это позволяет минимизировать габариты измерительной головки СЗМ, что особенно важно для работы в ограниченном пространстве криостатов, электромагнитов и биологических инкубаторов.

Непосредственно процесс автоматизированного сближения, как правило, строится по итерационному алгоритму: после каждого шага грубого двигателя система управления анализирует наличие сигнала взаимодействия. Если сигнал отсутствует или ниже порогового значения, подается команда на следующий шаг; при достижении порогового значения грубое сближение прекращается, и дальнейшее позиционирование осуществляется прецизионным Z-сканером в режиме обратной связи. Критическое значение имеет синхронизация работы шагового двигателя и системы обратной связи во избежание «пропуска» момента установления взаимодействия и, как следствие, аварийного контакта.

## 1.2. Система сканирования

Центральным элементом любого сканирующего зондового микроскопа, в значительной степени определяющим его метрологические характеристики, является система сканирования — прецизионный электромеханический узел, обеспечивающий взаимное перемещение зонда и образца по трём пространственным координатам (X, Y в латеральной плоскости и Z по нормали к поверхности). В подавляющем большинстве современных СЗМ в качестве исполнительных элементов сканирующей системы используются пьезокерамические сканеры, принцип действия которых основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте — способности некоторых кристаллических материалов (пьезокерамики) изменять свои геометрические размеры под воздействием приложенного электрического поля.

Пьезокерамика, синтезируемая на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС, PZT), обладает уникальным сочетанием свойств, делающих её практически безальтернативным материалом для сканирующей зондовой микроскопии: коэффициенты пьезомодуля обеспечивают относительную деформацию до $10^{-3}$ и позволяют получать перемещения от долей нанометра до сотен

микрометров; высокая механическая жёсткость обеспечивает собственную резонансную частоту конструкции в десятки килогерц; вакуумная совместимость и устойчивость к большинству химических сред; способность работать в широком диапазоне температур — от криогенных до нескольких сотен градусов Цельсия.

Конструктивно пьезокерамические сканеры реализуются в нескольких основных геометрических схемах, выбор которых определяется конкретными требованиями к диапазону перемещений, резонансной частоте, ортогональности осей и габаритным ограничениям.

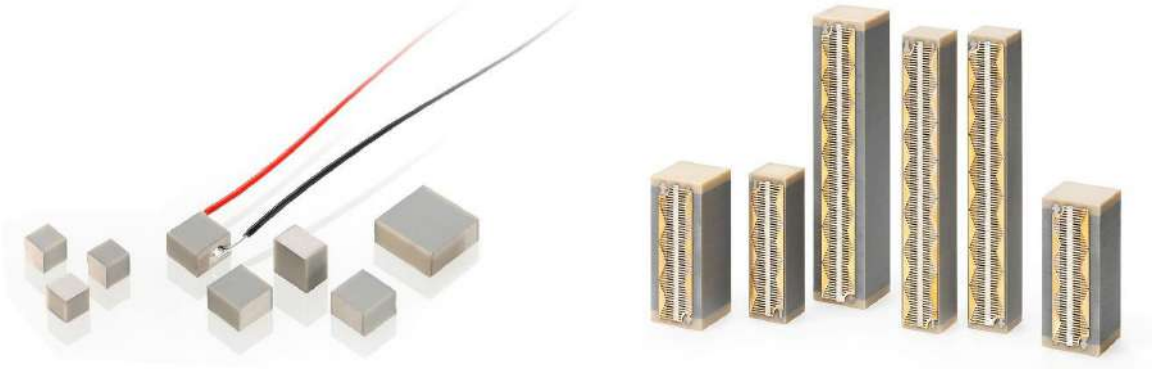


Рисунок 2. Пьезокерамические элементы (слева) и многослойные пьезопакеты (справа) производства компании Physik Instrumente (PI)

Наиболее исторически ранней является схема сканера-треноги [10], в которой три независимых пьезокерамических стержня или пластины расположены по трём взаимно перпендикулярным направлениям. Преимуществом такой схемы является высокая степень ортогональности перемещений и относительная простота изготовления. Недостатком — сравнительно большие габаритные размеры и относительно низкая собственная резонансная частота, обусловленная большой массой подвижных частей.

Широкое распространение в коммерческих и исследовательских СЗМ получили трубчатые сканеры [11]. В этой конструкции используется полая тонкостенная трубка из пьезокерамики, на наружную поверхность которой нанесены четыре секторных электрода, а внутренняя поверхность покрыта сплошным электродом. Подача противофазных напряжений на пары противоположных секторных электродов вызывает изгиб трубки в соответствующем латеральном направлении (X или Y), а изменение потенциала на внутреннем электроде относительно наружных — удлинение или укорочение трубки по оси Z. Трубчатые сканеры компактны, технологичны в изготовлении и обеспечивают высокие значения резонансной частоты (до нескольких десятков килогерц), что делает их предпочтительным выбором для большинства приложений.

Для специализированных задач, требующих больших площадей и высоких скоростей сканирования, применяются биморфные сканирующие элементы [12, 13]. Биморф представляет собой двухслойную структуру из пьезоэлектрических пластин с противоположным направлением вектора поляризации. При подаче напряжения один слой расширяется, а другой сжимается, что вызывает изгиб всей структуры с существенно большей амплитудой, чем простое линейное удлинение одиночного

элемента. Биморфные сканеры позволяют реализовывать высокоскоростное сканирование в ограниченном диапазоне перемещений и часто используются в системах с дополнительными емкостными или оптическими датчиками положения.

Принципиальными фундаментальными недостатками всех пьезокерамических материалов, вносящими существенные искажения в СЗМ-изображения, являются нелинейность, гистерезис и крип [11] (ползучесть). Нелинейность проявляется в отклонении зависимости деформации от приложенного напряжения от строго линейной, что приводит к геометрическим искажениям масштаба и ортогональности осей. Гистерезис обусловлен сегнетоэлектрической природой пьезокерамики: деформация при одном и том же значении напряжения зависит от направления развертки управляющего электрического напряжения. Величина гистерезиса может достигать 15–20% от полного диапазона перемещений, что вызывает расхождение топографических профилей, измеренных при прямом и обратном сканировании [14].

Крип (ползучесть) представляет собой медленное, логарифмическое во времени изменение деформации после быстрого изменения управляющего напряжения. Этот эффект особенно критичен при смещении сканера на большое расстояние (например, при смене области сканирования или при работе в режиме «прыжков») и проявляется в виде характерных «шлейфов» за топографическими особенностями на СЗМ-изображении.

Для компенсации этих негативных эффектов в современном приборостроении применяются два основных подхода. Первый — программная коррекция, заключающаяся в предварительной калибровке сканера по эталонным мерам с известной геометрией и последующей математической обработке полученных данных с использованием моделей, описывающих нелинейность, гистерезис и крип [15]. Второй, более совершенный, — аппаратный, который предполагает введение в конструкцию сканера датчиков обратной связи (емкостных, оптических, тензометрических), измеряющих реальное перемещение, и замыкание контура регулирования по положению перемещаемого элемента [11, 16]. Этот подход позволяет практически полностью избавиться от всех видов искажений, включая термодрейф, однако существенно усложняет и удорожает конструкцию микроскопа.

Пьезоэлектрический сканер (трубчатый или многослойный пьезопакет) представляет собой колебательную систему с ее собственными резонансными частотами. Низкочастотные резонансы связаны с упругими свойствами крепления и корпуса (иногда называются конструктивными), а более высокие – с резонансом самого пьезоэлемента. У качественных несбалансированных трубчатых сканеров частота первых резонансов по вертикали и горизонтали составляет 1–5 кГц, добротность этих резонансов может достигать десятков [17, 18]. Для зондовых микроскопов, требующих широкую полосу пропускания, стремятся к повышению частот собственных резонансов сканеров. Например, миниатюрный Z-сканер, описанный в [18], имел предсказанные первые резонансы 27 кГц по осям XY и 33 кГц по Z. В работе [19] достигнуты первые резонансы ≈ 100 кГц по оси Z и ≈ 2.3 кГц по осям XY.

Z-сканер – самый медленный элемент обратной связи [17], поэтому его собственные колебания определяют быстродействие обратной связи и скорость

сканирования. Высокая добротность приводит к длительному затуханию колебаний после изменения положения. Например, в работе [17] затухание колебаний Z-сканера занимало ≈38 мс без специального управления, тогда как при активном демпфировании это время сократилось до ≈1.1 мс. Резонансы проявляются в АЧХ и ФЧХ сканера пиками и фазовым сдвигом, причем без их подавления даже ограниченная частотная полоса работы системы заканчивается значительно ниже первой моды, а при попытках её расширить появляется риск появления положительной обратной связи, сильных колебаний и искажений.

## Пассивные методы подавления резонансов

Традиционно резонанс гасится с помощью пассивных демпферов и упругих материалов. Известно, что механическое демпфирование или использование массивных элементов снижает добротность сканера, но значительно ограничивает диапазон хода и накладывает особые требования, усложняющие изготовление конструкции. Альтернативный подход — конструктивное решение, обеспечивающее динамическое балансирование, уменьшающее (демпфирующее) резонансные колебания. Например, в некоторых системах используют два Z-пьезоактуатора, движущихся в противоположном направлении, чтобы минимизировать перемещение центра масс [17]. Это снижает возбуждение низкочастотных конструктивных резонансов без дополнительного усложнения системы управления. Однако такой «балансирующий» метод не подавляет резонансы самих пьезоэлементов и имеет ограничения по усложнению механической конструкции.

## Активное демпфирование резонансов

Управление демпфированием резонансов является альтернативным методом снижения ограничений полосы пропускания, накладываемых механическим резонансом. Контроллеры демпфирования подавляют, а не инвертируют механический резонанс, что позволяет им лучше подавлять внешние помехи и быть менее чувствительными к изменениям резонансной частоты.

Активные методы используют обратную связь по положению или напряжению пьезоэлемента, чтобы добавить к управляющему сигналу компонент, гасящий резонанс. В литературе был успешно продемонстрирован ряд методов управления демпфированием, к ним относятся: положительная обратная связь по положению, шунтирующее управление с использованием дополнительных емкостей, силовая обратная связь, интегральное резонансное управление [20].

Эффективным оказалось гашение колебаний посредством встроенной обратной связи по самому пьезоэлементу (self-sensing). Купер и Шиттер продемонстрировали, что подключение пьезосканера к мостовой схеме позволяет измерять возникающее напряжение (колебания) и через обратную связь снизить первые резонансные пики на ≈18 дБ [16]. При этом интеграция дополнительных сенсоров не требуется, поскольку датчиком является сам пьезоэлемент. В результате авторы наблюдали резкое уменьшение вибраций сканера при сканировании образца с треугольным профилем и «чистые» АСМ-изображения, полученные с частотой сканирований линий 122 Гц (при размере изображения 4x4 мкс, 256x256 точек).

В работе [17] авторы использовали схему с двумя активными каналами для двух Z-актуаторов: «контрблансирование» конструктивных резонансов, а также ПИД-

контроллер, разделённый на управление образцом и компенсатор («mock actuator») для независимого демпфирования первой моды. Они убедительно показали, что активное демпфирование существенно снижает добротность первой моды сканера (пример: с 18 до 0.5), ускоряет отклик (с сотен до единиц мс) и позволяет работать даже на частотах выше первой моды без сильных искажений. При таком активном демпфировании сдвиг по фазе выражен ярко, но его можно компенсировать с помощью метода обратного преобразования [17].

### Режекторные фильтры

Простейшая фильтрация заключается в уменьшении амплитуды сигнала на частотах, расположенных вблизи резонанса с помощью режекторного фильтра. Это часто делают для увеличения запаса устойчивости управляющей петли: узкая полоса частот вырезается из регулирования. Однако подобная фильтрация «гасит» только узкий диапазон частот. Недостатком этого метода является низкая скорость переходных процессов в режекторном фильтре. Например, в вышеупомянутой работе [17] замечено, что обычный режекторный фильтр давал слишком медленный отклик, поэтому авторы перешли к активному методу.

### Feedforward-контроль

Динамическое подавление можно рассматривать и как предварительное формирование управляющего сигнала. Идея – рассчитать модель сканера и в формируемый сигнал добавить «антивибрационный» компонент. Такой подход называется feedforward-контролем. Даже при использовании feedforward-контроля без прямой обратной связи удаётся повысить скорость позиционирования за счет учета динамики сканера [21]. Основной недостаток заключается в том, что модель сканера должна быть точна, иначе ошибки приведут к резонансным колебаниям. Тем не менее, сочетание feedforward-контроля и обратной связи может существенно «выпрямить» АЧХ и повысить устойчивость системы.

### Модальное и адаптивное управление

Современные методы управления нацелены на подавление конкретных мод сканера. К примеру, модальный контроль строится так, чтобы не пытаться моделировать всю систему, а локально подавлять одну или несколько мод. Адаптивные алгоритмы автоматически отслеживают изменение резонансных частот (например, из-за температур или нагрузки) и перестраивают фильтры или коэффициенты усиления. Например, адаптивная балансировка мостовой схемы на нужных частотах компенсирует нелинейности пьезоэлемента (гистерезис), автоматически сохраняя корректное измерение колебаний [16]. Аналогично можно применять адаптивные режекторные фильтры (аналоговые или цифровые), которые в режиме реального времени «повышают» коэффициент демпфирования по узким полосам, когда детектируется усиление на резонансе.

Кроме оптимизации системы управления по стабильности и быстродействию необходимо оптимизировать и конструкцию сканера. На практике для увеличения первой резонансной частоты стремятся сделать сканер компактным и жёстким [18], сохраняя при этом достаточный диапазон перемещения по Z (>5–10 мкм). В ряде серийных систем (например, FlexAFM, FastScan) такие упругие элементы

конструкции сканеров, повышающие резонансные частоты, реализованы и запатентованы.

### Оценка эффективности сканера

При оценке эффективности динамического подавления резонанса важны несколько ключевых параметров: время отклика и установления, амплитуда паразитных колебаний, соотношение сигнал/шум, пространственное разрешение и точность позиционирования, скорость сканирования.

**Время отклика и переходного процесса (успокоения).**

Для измерения времени отклика регистрируется переходный процесс, возникающий как реакция на импульсный или ступенчатый входной сигнал. Время, за которое сканер достигнет устойчивого положения, и сигнал перерегулирования важны для оценки полосы пропускания. Например, работа СС без демпфирования часто приводит к замедлению установления устойчивого положения Z-сканера, а работа с демпфированием – к быстрому переходному процессу.

**Амплитуда паразитных колебаний (резонансные пики).**

Для оценки степени демпфирования резонансной частоты измеряют АЧХ и сравнивают высоты пиков. Уменьшение на десятки дБ до и после демпфирования (например, на 18 дБ, как в [16]) свидетельствует о хорошем демпфировании.

**Соотношение сигнал/шум.**

Собственные шумы пьезорезонансного сканера — это совокупность его тепловых и технических шумов, проявляющаяся как спонтанные колебания пьезокерамики, ограничивающие минимальный разрешаемый сигнал. Уменьшение фоновых шумов позволяет поднять скорость сканирования.

**Пространственное разрешение и точность позиционирования.**

Пространственное разрешение и точность позиционирования измеряются на эталонных образцах, структура которых заранее известна. Сравниваются изображения, полученные до и после применения процедуры оптимизации, при этом, сканирование до процедуры оптимизации выполняется при максимальном коэффициенте усиления в разорванной цепи ОС, когда работа СС еще стабильна, а дальнейшее увеличение усиления дестабилизирует работу СС. Сканер с хорошо компенсированным резонансом сохраняет разрешение на высоких скоростях, в то время, как аналогичное разрешение при не скомпенсированном резонансе достигается при меньшей скорости.

**Скорость сканирования (линий/с, пикселей/с).**

Измеряется максимально возможная скорость сканирования в единицах строк/с, пикселей/с при максимально возможном коэффициенте усиления в разорванной петое ОС.

## 1.3. Система управления, сбора и обработки данных

С точки зрения теории автоматического управления, сканирующий зондовый микроскоп представляет собой сложную многоконтурную систему автоматического регулирования с обратной связью. В простейшем, но наиболее распространённом случае, задача системы управления сводится к поддержанию постоянным заданного

параметра взаимодействия зонда с образцом (туннельного тока, силы, амплитуды колебаний кантилевера, ионного тока и т.д.) путем непрерывного регулирования расстояния между зондом и поверхностью по нормали (координата Z) в каждой точке латерального сканирования (X, Y). Совокупность значений Z-координаты, зарегистрированных в точках растра, формирует топографическое изображение поверхности.

Эволюция архитектур систем управления СЗМ прошла путь от полностью аналоговых схем на операционных усилителях до современных полностью цифровых решений. Аналоговые системы, доминировавшие на ранних этапах развития СЗМ, обладали высоким быстродействием, но были крайне ограничены в гибкости: изменение алгоритма управления или методики измерения требовало физической модификации электронных цепей. Кроме того, аналоговые системы были подвержены шумам, температурному дрейфу параметров компонентов и не позволяли реализовывать сложные адаптивные стратегии сканирования.

Переход к цифровым системам управления стал революционным шагом в развитии зондового приборостроения. Современный цифровой контроллер СЗМ строится, как правило, по модульной архитектуре и включает следующие ключевые компоненты: быстродействующие аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи с разрешением 16–24 бит и частотой преобразования до нескольких мегагерц; вычислительное ядро, реализующее алгоритмы цифровой обработки сигналов и управления в реальном времени; интерфейс связи с управляющим компьютером.

В качестве вычислительного ядра современных контроллеров всё чаще используются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и цифровые сигнальные процессоры (DSP) [22]. ПЛИС, в частности семейства FPGA (Field-Programmable Gate Array), предоставляют уникальную возможность реализовывать сложные, ресурсоёмкие алгоритмы обработки сигналов и управления на аппаратном уровне, что обеспечивает минимальные и, что критически важно, детерминированные временные задержки в контуре обратной связи. В отличие от процессорных систем с последовательным выполнением команд, ПЛИС позволяют организовать параллельную обработку множества каналов и задач, что делает их идеальной платформой для построения высокоскоростных многомодовых СЗМ. DSP, в свою очередь, могут использоваться для выполнения специализированных вычислительных операций, таких как цифровая фильтрация, быстрое преобразование Фурье и вычисление корреляционных функций.

Программное обеспечение (ПО) современного СЗМ представляет собой многоуровневый комплекс, функционально разделяемый на ПО нижнего уровня (прошивки ПЛИС и DSP), обеспечивающее непосредственное управление аппаратурой в реальном времени, и ПО верхнего уровня, функционирующее на управляющем компьютере и предоставляющее пользовательский интерфейс.

Основные функции ПО верхнего уровня включают: управление параметрами эксперимента (размер области сканирования, количество точек, скорость сканирования, параметры обратной связи); визуализацию данных в реальном масштабе времени в виде двумерных топографических карт, профилей сечений и

трёхмерных реконструкций; сохранение и загрузку экспериментальных данных; а также инструменты предварительной и финальной обработки изображений. К последним относятся операции вычитания фона (плоскости или поверхности второго порядка для компенсации наклона образца), медианная и гауссова фильтрация для подавления шумов, коррекция геометрических искажений, вносимых нелинейностью и гистерезисом сканера, а также количественный анализ изображений, заключающийся в расчете статистических параметров шероховатости, гранулометрический анализ, построение автокорреляционных и спектральных функций [23].

## 1.4. Датчики взаимодействия зонда с образцом (зондовые датчики)

Зондовый датчик является ключевым информационным элементом СЗМ, типом и характеристиками которого определяется не только метод сканирования, но и предельно достижимое разрешение, чувствительность и функциональные возможности прибора в целом. В случае СТМ – это острые металлические иглы с преобразователем ток-напряжение (ПТН); в случае АСМ – разнообразные упругие микробалки (с заостренным микровыступом на свободном конце) с преобразователем прогиба балки в электрический сигнал; в случае СБОМ – заостренные оптические волокна, боковая поверхность которых запылена металлической пленкой, и преобразователем светового потока в электрический сигнал; в случае СИПМ – заполненный жидким электролитом заостренный стеклянный или кварцевый капилляр с металлическим электродом внутри, на поверхности которого происходит электрохимическая реакция преобразования ионного тока в электронный. Рассмотрим основные типы зондовых датчиков, релевантных тематике настоящей работы.

**Классические кантилеверы** [25]**.**

В атомно-силовой микроскопии в качестве зондового датчика используется кантилевер — упругая консоль (микробалка) с интегрированным на её свободном конце острым зондом (иглой). Современные кантилеверы изготавливаются методами фотолитографии и селективного травления, как правило, из монокристаллического кремния или нитрида кремния ($Si_3N_4$), что обеспечивает высокую воспроизводимость геометрических и механических параметров. Длина кантилевера составляет от десятков до сотен микрометров, толщина — единицы микрометров, радиус закругления острия зонда — от единиц до десятков нанометров.

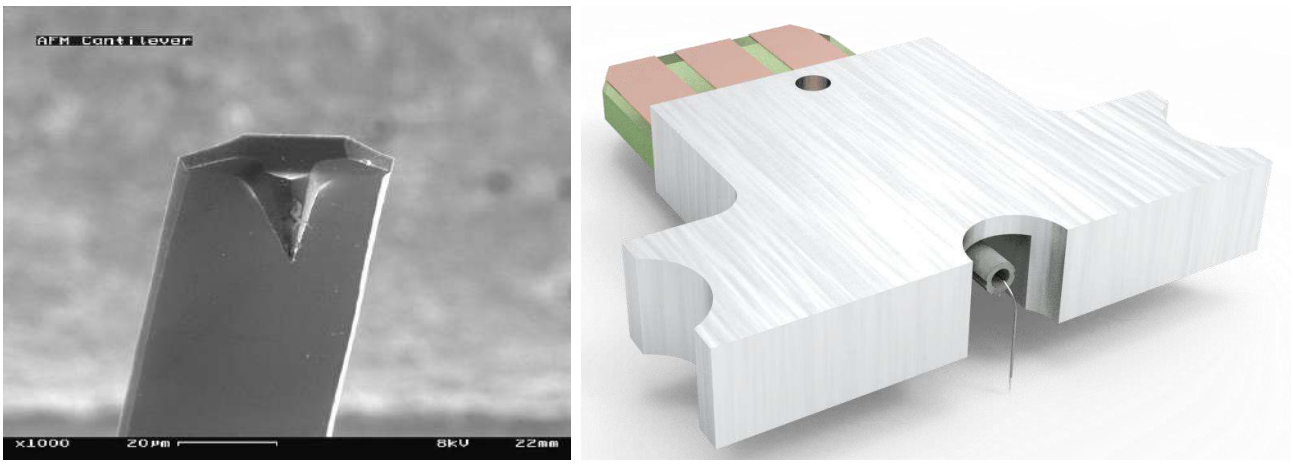


Рисунок 3. Кремниевый кантилевер (слева) и пьезорезонансный датчик с W иглой (справа)

Ключевыми параметрами кантилевера, определяющими его пригодность для конкретного измерительного режима, являются: коэффициент жёсткости, характеризующий упругость консоли (варьируется в широких пределах от ~0,01 до ~100 Н/м); собственная резонансная частота, лежащая в диапазоне от единиц килогерц до нескольких мегагерц; и добротность — мера остроты резонансного пика, определяющая чувствительность и скорость отклика датчика. В контактном режиме АСМ используются мягкие кантилеверы с низким коэффициентом жёсткости, тогда как для динамических (полуконтактных и бесконтактных) режимов предпочтительны жёсткие кантилеверы с высокой резонансной частотой.

В работе [26] представлен вывод максимальной силы и деформации зонда в режиме амплитудной модуляции (АМ) АСМ:

$$d_{max} \cong 1.405\sqrt[3]{(\xi - \xi^3) * k_C^2/Q_C^2 k_S^2} * A_0 \quad (1)$$

$$F_{max} \cong 1.405\sqrt[3]{(\xi - \xi^3) * k_S^2 k_C^2/Q_C^2} * A_0 \quad (2)$$

где $k_C$ – жесткость кантилевера, $k_S$ – жесткость образца, $Q_C$ – добротность кантилевера, $\xi$ – параметр рассогласования, равный:

$$\xi = A/A_0 \quad (3)$$

где $A$ – амплитуда кантилевера, установившаяся вблизи поверхности образца, $A_0$ – амплитуда свободного резонанса вдали от поверхности образца.

Регистрация отклонения кантилевера под действием сил взаимодействия с поверхностью осуществляется преимущественно оптическим рычажным методом: луч полупроводникового лазера фокусируется на отражающую поверхность кантилевера, а отражённый луч попадает на позиционно-чувствительный четырёхсекционный фотодиод. Смещение пятна отражённого луча по фотодиоду пропорционально изгибу кантилевера. Данный метод обеспечивает субангстремное разрешение по вертикали, но требует прецизионной юстировки оптической системы и вносит ограничения при работе в жидких средах из-за эффектов рассеяния и преломления луча на границах раздела сред.

**«Self-sensing» зондовые датчики.**

Схема, в которой в зонд встроена система измерения прогиба кантилевера, называется «self-sensing», и она позволяет полностью отказаться от оптической системы детектирования, что радикально упрощает и миниатюризирует конструкцию измерительной головки СЗМ и особенно ценно при работе в условиях ограниченного пространства.

Среди «self-sensing» зондовых датчиков можно выделить: кремниевые кантилеверы с пьезорезистором [27, 28], и различные типы пьезорезонансных датчиков (кварцевые резонаторы [29, 30], комбинированный кантилевер, предложенный Окаяма (кварцевый камертон с прикрепленным к нему Si кантилевером) [29, 31], пьезотрубчатый датчик [32].

В типичной конструкции «self-sensing» зондового датчика [33] на основе кварцевого резонатора используется стандартный часовой кварцевый резонатор с частотой 32768 Гц, к одному из плеч камертона которого приклеивается металлическая игла или отрезок оптического волокна, выполняющий роль зонда. Ключевым преимуществом такого датчика является использование прямого и обратного пьезоэффекта кварца: переменное напряжение, приложенное к электродам резонатора, возбуждает механические колебания камертона с зондом на его резонансной частоте, а пьезоэлектрический ток, генерируемый при этих колебаниях, служит сигналом для измерения их амплитуды и фазы.

К числу значимых преимуществ датчика из кварцевого камертона следует отнести также чрезвычайно высокую механическую жёсткость (до ~20 кН/м), что позволяет работать при сверхмалых амплитудах колебаний (доли нанометра) и минимизировать силовое воздействие на образец. К кварцевому датчику можно прикрепить длинное острие для работы в жидкости, а сам датчик при этом в жидкость не погружать. Но длинное острие будет слишком тяжелым для часового кварцевого резонатора и погасит его колебания.

Датчик из пьезотрубок (Рисунок 3 справа) хотя изначально и имеет небольшую добротность по сравнению с кварцем, но может работать с длинным острием.

Конструкция датчика, позволяющая использовать массивные и протяжённые иглы, была предложена и экспериментально реализована в работах Лапшина, Решетова, Секацкого и Летохова [34, 35]. Вместо стандартного кварцевого камертона авторы сконструировали резонатор камертонного типа из двух коротких пьезокерамических трубок, закреплённых на общем основании. К одной из трубок жёстко фиксировался заострённый конец оптического волокна со свободной длиной всего около 0,1 мм, что обеспечивало высокую жёсткость системы. Возбуждение резонатора и считывание сигнала осуществлялись с помощью автогенераторной схемы, причём одна трубка работала как возбудитель, а вторая — как приёмник колебаний благодаря прямому пьезоэффекту. Такой датчик, позволял контролировать амплитуду колебаний зонда на уровне 0,1–10 нм и поддерживать постоянный механический контакт с образцом во время сканирования. В работе [35] с использованием этого сенсора были получены как топографические, так и оптические изображения дифракционной решётки с периодом 10 мкм в фотонном сканирующем туннельном микроскопе. Авторы показали, что разработанный контактный метод контроля расстояния принципиально пригоден для реализации FRET-микроскопии,

где необходимо поддерживать зазор порядка 1–5 нм, и может быть использован для работы с тяжёлыми зондами, включая алмазные и тетраэдрические, а также в вакуумных и криогенных условиях.

**Зонды для сканирующих ион-проводящих микроскопов.**

В сканирующей ион-проводящей микроскопии (СИПМ) можно выделить два типа зондов: на основе стеклянных или кварцевых нанокапилляров и на основе Si кантилеверов с полой кремниевой пирамидкой и микрофлюидным каналом для подачи электролита [36, 37]. Используя второй тип зондов, которые известны как FluidAFM, можно совместить силовой режим с ион-проводящим режимом сканирования.

Нанокапилляр (нанопипетка) — стеклянная пипетка, вытянутая в конический капилляр с внутренним радиусом при вершине порядка 10–100 нм [24]. Капилляр заполняется электролитом (буферным раствором), и в его внутреннюю полость вводится электрод (как правило, хлорсеребряный). При погружении капилляра в электролитическую ячейку с исследуемым образцом, в которую также помещен внешний электрод, формируется электрическая цепь, через которую протекает ионный ток. Величина этого тока определяется приложенным напряжением и локальным сопротивлением электролита в зазоре между вершиной капилляра и поверхностью образца. При приближении нанокапилляра к непроводящей (или слабо проводящей) поверхности, зазор для протекания ионов сужается, что вызывает резкое возрастание сопротивления и, соответственно, падение ионного тока. Именно этот ток (или его изменение) служит сигналом для системы обратной связи в СИПМ.

Ионный ток в нанопипетке описывается системой уравнений [39]:

1. Уравнение Нернста–Планка (для потока ионов):

$$N_i = -D_i \nabla \mathrm{c}_i - z_i F u_i c_i \nabla \Phi + u c_i \qquad (4)$$

где $N_i$ – поток ионов, $D_i$ – коэффициент диффузии, $\mathrm{c}_i$ – концентрация ионов, $z_i$ – заряд иона, $F$ – постоянная Фарадея, $u_i$ – подвижность иона, $\Phi$ – электрический потенциал, $u$ – вектор скорости (конвекция);

2. Уравнение Пуассона (для электрического поля с учётом объёмного заряда):

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{F}{\varepsilon \varepsilon_0} \sum_i z_i c_i \qquad (5)$$

где $\Phi$ – электрический потенциал, $F$ – постоянная Фарадея, $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость среды, $\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость вакуума, $z_i$ – заряд иона, $\mathrm{c}_i$ – концентрация ионов;

3. Уравнение Навье–Стокса (для электроосмотического течения):

$$\rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = \mu \Delta \vec{u} - \nabla p \qquad (6)$$

где $\rho$ – плотность электролита, $\vec{u}$ – скорость потока, $\mu$ – кинематическая вязкость, $p$ – давление;

4. Связь электроосмотической скорости с потенциалом (Хельмгольца–Смолуховского):

$$u_{EOF} = \frac{\xi \varepsilon \varepsilon_0}{\mu} \nabla \Phi \quad (7)$$

где $u_{EOF}$ – скорость электроосматического потока, $\xi$ – дзета-потенциал поверхности, $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость среды, $\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\mu$ – кинематическая вязкость, $\Phi$ – электрический потенциал;

5. Условие стационарности (отсутствие зависимости от времени):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

6. Поправка к коэффициенту диффузии (учёт межионных взаимодействий):

$$D_i = D_i^0 \left(1 + C_i \cdot \frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial C}\right) \quad (9)$$

где $D_i$ – коэффициент диффузии, $D_i^0$ – коэффициент диффузии при бесконечном разбавлении, $C_i$ – концентрация раствора, $\gamma_i$ – коэффициент активности ионов;

Использование нанокапилляра в качестве зонда обеспечивает принципиальную возможность бесконтактного топографического картирования чрезвычайно мягких объектов, таких как живые клетки, липидные мембраны, белковые агрегаты, в нативных физиологических условиях без приложения к ним механических сил, неизбежных в АСМ. Это делает СИПМ одним из наиболее ценных и перспективных методов для современной клеточной биологии и биофизики.

Альтернативой дорогостоящего и сложного FluidAFM зондового датчика являются пьезорезонансный датчик на основе пьезотрубки, в котором традиционный вольфрамовый зонд заменен стеклянной микропипеткой [40]. Такое решение позволяет реализовать полуконтактную силовую моду для визуализации топографии и оценки локальной жёсткости образца, а за счёт заполнения внутреннего объёма пипетки электролитом и введения электрода — параллельно измерять ионные токи, протекающие через её отверстие. Конечно, стеклянная нанопипетка имеет более жесткие ограничения для работы в силовом режиме по сравнению с вольфрамовой иглой. В работе [38] показано, какие поперечные и продольные силовые нагрузки выдерживают стеклянные нанопипетки.

## 1.5. Проблема быстродействия СЗМ и метод СИПМ в режиме «hopping»

Рассмотрев в предыдущих разделах ключевые подсистемы СЗМ, определяющие их функциональность и точность, перейдем к детальному анализу фактора, который сегодня является одним из главных ограничений практического применения многих методик зондовой микроскопии — фактора быстродействия.

Несмотря на впечатляющий прогресс в области пространственного разрешения и чувствительности, традиционные сканирующие зондовые микроскопы остаются относительно медленными приборами. Время, необходимое для получения одного полноценного топографического изображения (кадра) стандартного размера (например, 100 × 100 точек), в зависимости от метода, параметров эксперимента и свойств образца может варьироваться от нескольких минут до десятков минут и даже

часов. Столь низкая производительность накладывает принципиальные ограничения на круг решаемых задач, делая крайне затруднительным или невозможным исследование быстропротекающих динамических процессов в реальном времени (движение биологических макромолекул, рост кристаллов, перестройка поверхности при адсорбции, функционирование ионных каналов), проведение статистически достоверных измерений на больших выборках объектов, а также использование СЗМ в качестве инструмента рутинного скрининга и контроля в промышленных и клинических приложениях.

Фундаментальные причины, ограничивающие скорость сканирования в СЗМ, имеют комплексную физико-техническую природу [41, 42]. Во-первых, это механический резонанс сканера. Любой пьезокерамический сканер представляет собой упругую механическую систему с распределённой массой, обладающую спектром собственных резонансных частот. При увеличении частоты сканирования и приближении её к первому резонансу, амплитуда паразитных колебаний и фазовые искажения резко возрастают, что приводит к появлению характерных артефактов в виде «звона», проявляющегося на СЗМ изображениях в виде периодических волн и выбросов, возникающих при работе СС при сканировании поверхности с достаточно резкими перепадами рельефа.

Во-вторых, это конечное время отклика системы обратной связи. Петля обратной связи, поддерживающая постоянным сигнал взаимодействия зонда с образцом, содержит ряд последовательных элементов, каждый из которых вносит свою временную задержку, складывающуюся из времени преобразования сигнала датчика, времени аналого-цифрового преобразования, времени вычисления корректирующего воздействия, времени цифро-аналогового преобразования и, наконец, времени механического отклика сканера. При быстром перемещении зонда над резкими перепадами рельефа система обратной связи может не успевать отрабатывать эти изменения, что приводит либо к потере контакта (потере сигнала), либо, наоборот, к неконтролируемому «врезанию» зонда в образец.

В-третьих, это ограничения, накладываемые системами сбора данных: конечные пропускная способность интерфейсов передачи данных, скорость записи на носители, производительность вычислительных систем при выполнении операций визуализации и предобработки в реальном времени.

В контексте настоящей диссертационной работы особый акцент делается на проблеме быстродействия применительно к одному из наиболее деликатных, но одновременно и наиболее медленных методов СЗМ — сканирующая ион-проводящая микроскопия (СИПМ). Данный метод, основанный на регистрации ионного тока через нанокапилляр, является одним из наиболее перспективных инструментов для неинвазивного исследования живых биологических объектов в физиологических условиях. Однако его практическое применение в значительной степени сдерживается именно низкой скоростью получения изображений.

В1994 году группа Paul K. Hansma предложила записывать кривые подвода (зависимость силы от расстояния до поверхности образца) во время сканирования и получать оттуда информацию о топографии поверхности, силах адгезии, электростатических взаимодействиях, упругости и силах трения [43]. Предложенный

метод позволяет получать изображения топографии и одновременно измерять разные свойства образца. Развитием этого метода стал режим работы ACM PeakForce Quantitative Nanomechanical properties Mapping (PeakForce QNM), который позволяет в каждой точке измерять модуль Юнга и адгезию [44]. В режиме PeakForce QNM при перемещении зонда между точками измерения он отводится на безопасное расстояние от образца [45, 46].

Аналогичным образом в 2009 году группой исследователей под руководством П. Новака и Ю.Е. Корчева [47] была решена проблема столкновений зонда с образцом при латеральном сканировании в СИПМ. Ими был разработан принципиально новый режим сканирования, получивший название hopping probe ion conductance microscopy (HPICM), или, как его чаще называют, hopping мода.

Принцип работы hopping моды кардинально отличается от традиционного растрового сканирования, при котором зонд непрерывно скользит вдоль строк изображения. В режиме «прыжков» сканирование осуществляется дискретно, точка за точкой (Рисунок 4). В каждой точке (пикселе) будущего изображения зонд выполняет следующую последовательность операций (цикл «прыжка»):

1. Зонд находится на безопасном расстоянии Z_base над поверхностью (как правило, несколько микрометров), где регистрируется опорное (базовое) значение ионного тока.

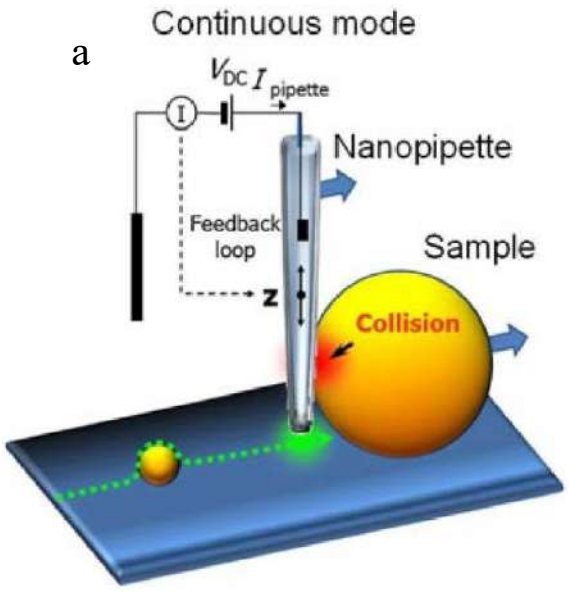
2. Осуществляется плавное сближение зонда с поверхностью по нормали (движение вниз) с одновременным мониторингом ионного тока.

3. В момент, когда ионный ток уменьшается на заданную пороговую величину (например, на 1–5% относительно базового уровня), что свидетельствует о достижении заданного нанометрового зазора между вершиной капилляра и поверхностью исследуемого образца, система обратной связи регистрирует текущую Z-координату как высоту поверхности в данной точке.

4. Зонд отводится обратно на безопасное расстояние Z_base (движение вверх).

5. Осуществляется латеральное перемещение в следующую точку сканирования.

а




б

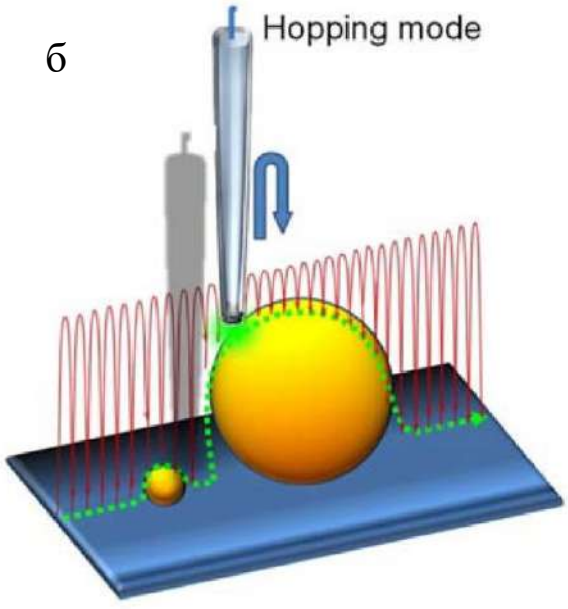


Рисунок 4. Принцип адаптивной ион-проводящей микроскопии с hopping модой. (a) Проблема для всех методов непрерывного сканирования зондом: отрицательный или очень крутой вертикальный наклон приводит к столкновению зонда с образцом. (b) Принцип hopping моды: пипетка отводится в положение, которое находится значительно выше образца, прежде чем приблизиться к поверхности.

Такая стратегия обеспечивает практически полную бесконтактность измерения: зонд приближается к поверхности только по нормали, а все латеральные перемещения выполняются на безопасном расстоянии, где отсутствует риск столкновения даже с очень крутыми топографическими особенностями, выступающими частями клеток (филоподиями, микроворсинками) или элементами сложного рельефа. Это стало решающим фактором, сделавшим возможным рутинное получение изображений высокого качества для таких чрезвычайно сложных объектов, как живые нейроны, астроциты, эпителиальные клетки и другие биологические системы с выраженным трёхмерным рельефом [48].

Однако реализация этой элегантной и высокоэффективной стратегии сопряжена с резким, многократным увеличением времени сканирования по сравнению с традиционным растровым режимом СИПМ (который и без того не отличался высоким быстродействием). Это увеличение обусловлено несколькими факторами. Прежде всего, в hopping моде в каждой точке изображения выполняется полный вертикальный цикл «спуск — регистрация — подъём». Время, затрачиваемое на этот цикл, складывается из времени механического перемещения сканера по оси Z, времени, необходимого для установления стационарного потока ионов в сужающемся зазоре, и времени отклика электронной системы детектирования тока. Для типичных параметров эксперимента время одного «прыжка» составляет от единиц до десятков миллисекунд.

Во-вторых, в режиме «прыжков» предъявляются повышенные требования к точности и стабильности системы позиционирования, поскольку любое отклонение от заданной траектории при латеральном перемещении на безопасной высоте не представляет опасности, однако ошибка позиционирования при фазе сближения может привести к контакту. Это накладывает дополнительные ограничения на скорость латеральных перемещений, вызывая необходимость пауз для затухания переходных процессов в механической системе.

В-третьих, поскольку hopping мода применяется для исследования живых, динамически изменяющихся объектов, особую важность приобретает не только средняя скорость сканирования, но и детерминированность времени получения изображения, его предсказуемость, что необходимо для корректной интерпретации наблюдаемых изменений.

Таким образом, главным достоинством hopping моды — является его исключительная деликатность с точки зрения воздействия на образец, делающая его безальтернативным инструментом для исследования живых клеток. В то же время, крайне низкая производительность hopping моды ограничивает его применимость для изучения динамических процессов, скрининговых исследований и практического использования в биомедицинских приложениях

Разрешение этого противоречия путем разработки интеллектуальных адаптивных алгоритмов управления, оптимизирующих процесс сканирования на основе анализа локальных свойств образца в реальном времени, и их эффективная аппаратная реализация на современной цифровой базе, является центральной научно-технической проблемой, на решение которой направлена настоящая диссертационная работа.

# 1.6. Пьезоэффект, пьезоэлектрический резонатор и эквивалентная схема Баттерворта–Ван Дайка

В данной работе исследуется измерительная головка СИПМ с инерциальным приводом грубого сближения зонда с образцом и узел прецизионного механического сканирования, в которых применяются пьезоактюаторы. Прямой и обратный пьезоэффект являются также основой исследуемого в данной работе пьезорезонансного датчика силового взаимодействия зонда с образцом. Поэтому в данном параграфе сделан краткий ретроспективный обзор работ по пьезоэффекту и электромеханическим резонаторам.

В 1880 году Жак и Пьер Кюри обнаружили прямой пьезоэлектрический эффект — возникновение электрической поляризации в некоторых кристаллах при их механической деформации [49]. В следующем году Габриэль Липпман, исходя из термодинамического принципа обратимости, предсказал существование обратного эффекта: деформации пьезоэлектрического кристалла под действием электрического поля [50]. Совокупность прямого и обратного эффектов означала, что пьезоэлектрик может работать как двунаправленный преобразователь между электрической и механической подсистемами.

В начале XX века феноменологическая теория пьезоэлектричества была систематизирована Вольдемаром Фойгтом в рамках линейной теории упругих кристаллов [51]. В этой теории механические напряжения и деформации связывались с электрическим полем и электрической индукцией посредством упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических коэффициентов. Тем самым была сформирована общая математическая основа для описания статического и динамического поведения пьезоэлектриков, хотя непосредственная связь такой континуальной модели с параметрами обычной электрической цепи ещё не была установлена.

Общая теория электрически возбуждаемых механических систем была сформулирована Стивеном Баттервортом [52]. В приближении малых линейных колебаний он рассмотрел механические системы, обладающие инерцией, упругостью и потерями, и показал, что их воздействие на внешнюю электрическую цепь может быть представлено комбинацией обычных сосредоточенных электрических элементов. Баттерворт выделил два класса электромеханических систем: системы, в которых возбуждающая механическая сила пропорциональна электрическому току, и системы, в которых она пропорциональна приложенному напряжению. Во втором случае возникающий вследствие механического движения дополнительный ток описывается последовательной цепью из индуктивности, сопротивления и ёмкости, подключённой параллельно электрической ёмкости преобразователя. Именно эта структура впоследствии оказалась непосредственно применима к пьезоэлектрическим резонаторам.

Для уравнения механического осциллятора:

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F \qquad (10)$$

Баттерворт получил электрическую систему с эквивалентным дифференциальным уравнением. В принятой сегодня электромеханической аналогии

механической массе $M$ соответствует индуктивность, коэффициенту вязкого затухания $B$ — сопротивление, а упругой податливости $1/K$ — ёмкость. Таким образом, отдельная механическая резонансная мода могла быть представлена комбинацией сосредоточенных электрических элементов.

Теоретические положения Баттерворт проверял на электромеханической системе с проводником, натянутым в магнитном поле. Для проведения измерений применялись существовавшие к тому времени метрологические средства, в том числе частотный мост и фильтр формы волны Кэмпбелла. Эти устройства использовались соответственно для определения частоты источника и подавления нежелательной гармоники, но не определяли структуру эквивалентной цепи, параметры которой Баттерворт выводил непосредственно из уравнений механического движения [52]. Работа Баттерворта сформулировала общий принцип электрического представления механических резонансных систем, из которого впоследствии выросла модель Баттерворта—Ван Дайка.

Практическая необходимость в эквивалентной электрической модели возникла после появления пьезоэлектрических кварцевых резонаторов. В 1922 году Уолтер Кэди показал, что переменное электрическое поле посредством обратного пьезоэлектрического эффекта возбуждает механические колебания кварцевого стержня [53]. Когда частота приложенного напряжения приближается к одной из собственных механических частот кристалла, амплитуда его деформации резко возрастает. Возникающие деформации, в свою очередь, вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта создают электрические заряды на электродах и дополнительный ток во внешней цепи. Поэтому механический резонанс кристалла проявляется в измеряемом электрическом импедансе как узкая резонансная особенность. Именно эта взаимосвязь позволила рассматривать пьезоэлектрический резонатор как электрический двухполюсник и поставила задачу описания его поведения с помощью эквивалентной электрической схемы.

Джордж Пирс развил эту идею и в 1923 году создал кварцевый автогенератор, частота которого определялась преимущественно собственной механической частотой кристалла [54]. Он также применил кварцевые резонаторы для прецизионной калибровки волномеров — приборов, предназначенных для измерения частоты или соответствующей ей длины волны радиосигнала. Эти работы превратили пьезоэлектричество из преимущественно физического явления в основу частотно-стабильных радиотехнических устройств, включая кварцевые генераторы, стандарты частоты, радиопередатчики и измерительную аппаратуру.

В середине 1920-х годов связь электрического отклика кварцевого резонатора с его собственными механическими колебаниями получила непосредственное экспериментальное и теоретическое подтверждение. Гибе и Шайбе исследовали стоячие продольные колебания кварцевых стержней и наблюдали основную моду и обертоны вплоть до пятнадцатого порядка [55]. Возникающие при деформации кристалла пьезоэлектрические напряжения вызывали светящиеся электрические разряды в разреженном газе, благодаря чему становилось возможным визуально наблюдать распределение колебаний вдоль стержня и фиксировать наступление резонанса. Почти одновременно Макс фон Лауэ применил феноменологическую

теорию Фойгта к вынужденным колебаниям кварцевых стержней и теоретически связал их собственные частоты с геометрией образца, упругими и пьезоэлектрическими параметрами кристалла [56]. В совокупности эти работы показали, что узкая резонансная особенность, наблюдаемая в электрической цепи, обусловлена возбуждением конкретной упругой моды кристалла, которая возбуждается и регистрируется благодаря обратному и прямому пьезоэлектрическим эффектам.

Непосредственное применение идеи Баттерворта к кварцевому резонатору было выполнено Дэвидом Даем. В работе 1926 года он показал, что вблизи отдельной механической моды кварцевый резонатор может быть представлен последовательной цепью из индуктивности, сопротивления и ёмкости, подключённой параллельно собственной диэлектрической ёмкости кристалла [57]. Последовательная ветвь описывала механическое движение, а параллельная ёмкость электрическую поляризацию кварцевой пластины. Для реального держателя Дай дополнительно вводил ёмкости воздушных зазоров. Рассчитанные по такой схеме частотные зависимости тока хорошо совпадали с экспериментальными резонансными кривыми в широком диапазоне частот.

Развивая общий подход Баттерворта и результаты Дая, Ван Дайк исходил из уравнений продольных упругих колебаний кварцевого резонатора, выполненного в виде стержня или пластины со срезом Кюри, и из пьезоэлектрических соотношений, связывающих деформацию кристалла с возникающим на электродах зарядом. Ван Дайк показал, что электрический отклик резонатора на внешнюю цепь можно разделить на две составляющие. Диэлектрический отклик кристалла описывается параллельной ёмкостью $C_0$, а возбуждение отдельной механической моды последовательной динамической ветвью, содержащей сопротивление $R_m$, индуктивность $L_m$ и ёмкость $C_m$. Параметры этой ветви связаны с эффективной массой, упругостью и механическими потерями резонатора, его геометрическими размерами и эффективностью электромеханического преобразования. Если в исследуемом диапазоне наблюдается несколько механических мод, каждая из них может быть представлена собственной динамической ветвью [58].

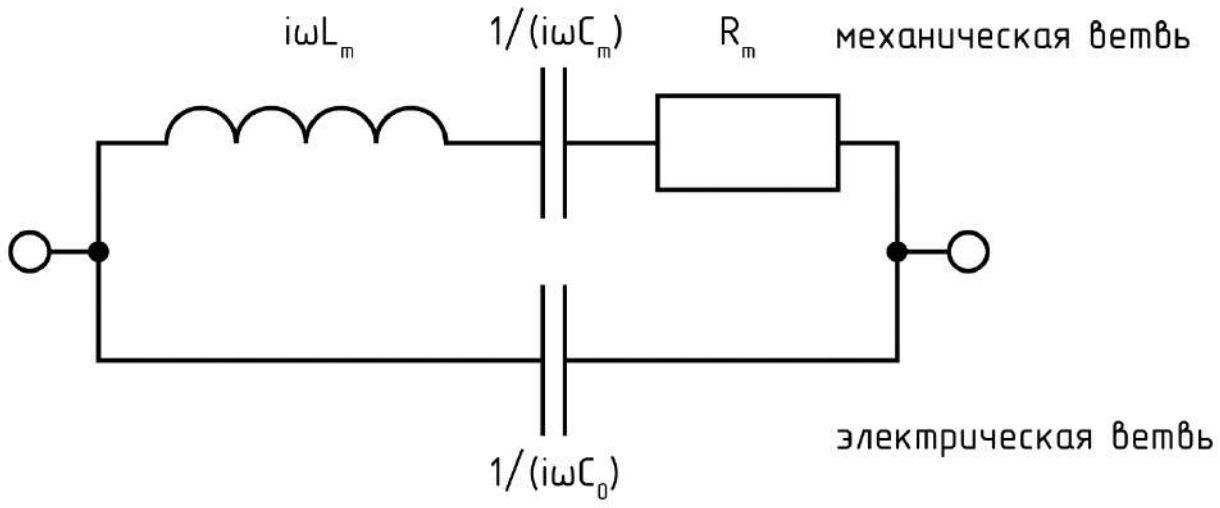


Рисунок 5. Эквивалентная схема Баттерворта—Ван Дайка

Электрический отклик схемы Баттерворта—Ван Дайка может быть выражен как через комплексный импеданс $Z(\omega)$, так и через комплексную проводимость:

$$Y(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} \tag{11}$$

Для параллельной структуры схемы Баттерворта—Ван Дайка удобнее использовать проводимость, поскольку проводимости статической ёмкости и динамической ветви складываются:

$$Y(\omega) = j\omega C_0 + \frac{1}{R_m + j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m}} \tag{12}$$

Здесь $L_m$ соответствует эффективной модальной инерции резонатора, $C_m$ его механической податливости, приведённой к электрическим выводам, а $R_m$ характеризует потери энергии, связанные с внутренним трением, механическим и акустическим рассеянием и другими диссипативными процессами. Ёмкость $C_0$ представляет электрическую ёмкость пьезоэлемента между электродами при подавленной механической деформации. В практической измерительной схеме в определяемое значение $C_0$ могут также входить ёмкости электродов, соединительных проводов и других элементов монтажа.

Последовательный резонанс динамической ветви возникает на частоте:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} \tag{13}$$

при которой индуктивная и ёмкостная реактивности динамической ветви взаимно компенсируются. В приближении малых потерь на этой частоте сопротивление динамической ветви определяется преимущественно величиной $R_m$. Поэтому полная проводимость резонатора возрастает, а модуль его импеданса обычно достигает локального минимума.

Взаимодействие динамической ветви с параллельной ёмкостью $C_0$ приводит к появлению антирезонанса. В идеальной модели Баттерворта—Ван Дайка его частота приближённо определяется выражением:

$$f_p \approx f_s \sqrt{1 + \frac{C_m}{C_0}} \tag{14}$$

Вблизи $f_p$ реактивные токи через динамическую ветвь и параллельную ёмкость частично компенсируются. В результате полная проводимость уменьшается, а модуль импеданса достигает максимума. Разность между частотами последовательного резонанса и антирезонанса связана с эффективностью электромеханического преобразования в пьезоэлектрическом элементе.

Для слабо затухающей механической моды добротность определяется выражением:

$$Q_m \approx \frac{\omega_s L_m}{R_m} = \frac{1}{\omega_s R_m C_m} \tag{15}$$

где $\omega_s = 2\pi f_s$. Таким образом, аппроксимация экспериментально измеренных зависимостей $Z(\omega)$ или $Y(\omega)$ схемой Баттерворта—Ван Дайка позволяет определить резонансную частоту, добротность, эффективную податливость, модальную инерцию и потери исследуемой механической моды.

Таким образом, модель Баттерворта—Ван Дайка занимает промежуточное положение между полной континуальной теорией пьезоэлектричества и экспериментально измеряемыми частотными зависимостями импеданса или проводимости. Она не описывает пространственное распределение деформаций и акустического поля и не заменяет расчёт механически связанной конструкции методом конечных элементов.

# Глава 2. Инерциальный шаговый пьезоэлектрический привод

Для работы зондового микроскопа необходима высокоточная система позиционирования, позволяющая точно сближать зонд и исследуемый образец. Исторически, такую систему, обеспечивающую прецизионное сближение зонда и образца, принято называть системой грубого сближения (coarse approach system) в отличие от системы точного сканирования зондом (или образцом) по координате Z, используемой для получения СЗМ-изображения. Интересно, что при этом система грубого сближения сложнее системы точного сканирования, которая, как правило, представляет собой простую пьезотрубку. Минимальный диапазон перемещения системы грубого сближения должен составлять несколько миллиметров, при этом точность перемещения должна находиться в пределах сотен, а еще лучше — десятков нанометров. Минимальный диапазон в несколько миллиметров обусловлен необходимостью замены зонда и образца, в то время как высокая точность перемещения, требуется для реализации надёжного алгоритма захвата взаимодействия между зондом и образцом без механического контакта и вывода системы точного сканирования по Z в среднюю точку в начале сканирования. Действительно для того, чтобы в процессе замены зонда (или образца) не повредить зонд, необходимо отвести его от образца как минимум не несколько миллиметров, а для реализации надёжного алгоритма захвата взаимодействия необходимо, чтобы шаг перемещения системы грубого сближения был бы на порядок меньше диапазона точного сканирования по координате Z, который обычно составляет несколько микрон (или менее микрона в случае сканирования со сверхвысоким разрешением по Z).

Существуют различные чисто механические подходы для достижения необходимой точности и диапазона перемещения. К ним относятся такие механизмы, как рычажная передача, дифференциальные винты и редукторы типа «мягкая пружина — жесткая мембрана». Эти устройства позволяют достигать требуемого диапазона перемещений с высокой точностью, однако имеют ограничения по чувствительности к внешним воздействиям.

Помимо механических решений, активно используются также электромагнитные и пьезоэлектрические приводы. Последние особенно популярны благодаря своей способности обеспечивать прецизионное управление перемещением, при малых габаритах. Пьезоэлектрический эффект заключается в изменении размеров материала под воздействием электрического поля, что делает возможным точное регулирование положения элементов.

При работе с зондовым микроскопом возникает необходимость защиты приводной системы от различных источников помех. Это включает защиту от тепловых дрейфов, акустического шума, вибраций и электромагнитных полей. Все эти факторы могут значительно ухудшить точность позиционирования. Поэтому особое внимание уделяется материалам и конструкции приводов, чтобы минимизировать влияние внешних воздействий. Пьезопривод, благодаря простоте,

может иметь компактную и жесткую конструкцию, а это обеспечивает защиту узла сканирования от внешних механических вибраций и тепловых дрейфов.

Иногда предъявляются дополнительные требования к размерам и условиям эксплуатации привода, включая низкие температуры и экстремально высокий вакуум. В таких случаях пьезоэлектрические приводы становятся наиболее предпочтительным решением благодаря своим уникальным свойствам.

Существует три основных класса пьезоэлектрических приводов [60]:

1. Резонансные приводы [61-63]: В таких системах пьезоэлемент генерирует колебания в ультразвуковом диапазоне, которые передаются на подвижную часть через фрикционное взаимодействие с основанием. Этот подход обеспечивает плавность движения и возможность точного контроля над перемещениями.
2. Шаговые пьезоприводы в квазистатическом режиме [63, 64]: Эти приводы используют несколько пьезоэлементов, которые поочередно прижимают и толкают подвижный элемент вдоль направления перемещения. Несмотря на высокую точность перемещения, достигаемую без использования обратной связи, такие приводы требуют сложной системы управления и синхронизации работы множества пьезоэлементов. Высокая стоимость производства и жесткие требования к точности изготовления компонентов делают такие приводы менее распространенными.
3. Инерционные пьезоприводы [6…8]: они представляют собой гибридные системы, сочетающие элементы шаговых и ультразвуковых приводов. В процессе работы происходит контролируемое проскальзывание каретки относительно стержня, закрепленного на пьезоэлементе. Перемещение каретки синхронизировано с удлинением пьезоэлемента, что позволяет регулировать величину шага перемещения.

## 2.1. Принцип работы и конструкция инерциального пьезопривода

Инерциальный пьезопривод (ИП), изображенный на Рисунке 6а, состоит из пьезоэлемента (1), стержня (2) и катерки (3), перемещающейся вдоль этого стержня. Существуют приводы, в которых пьезоэлемент либо связан с неподвижным основанием, либо перемещается вместе с кареткой [59]. В работе рассматривается первый вариант такого привода. Качественное объяснение эффекта перемещения каретки по стержню основано на том, что каретка массой $M_К$, расположенная на стержне, перемещается вместе с ним при плавном движении стержня и проскальзывает в силу инерции при резком ускорении стержня. Таким образом, чтобы каретка совершала пошаговое движение на пьезоэлемент, на котором закреплен стержень, требуется подавать несимметричные импульсы управляющего напряжения. На плавном фронте управляющего импульса пьезоэлемент плавно

вытягивается (или втягивается), а на резком втягивается (или вытягивается) быстро, так, что каретка проскальзывает относительно него.

Существуют ИП как вертикальные, в которых обеспечивается дополнительный прижим, чтобы каретка не сползала по стержню вниз, так и горизонтальные, в которых дополнительного прижима может не быть, так как каретку к стержню прижимает сила тяжести. Этап движения, когда слайдер перемещается вместе со стержнем, и их относительная скорость равна нулю, в литературе имеет устойчивый термин - Stick (прилипание). Этап, когда относительная скорость стержня и слайдера отлична от нуля и возникает проскальзывание, имеет термин Slip (скольжение).

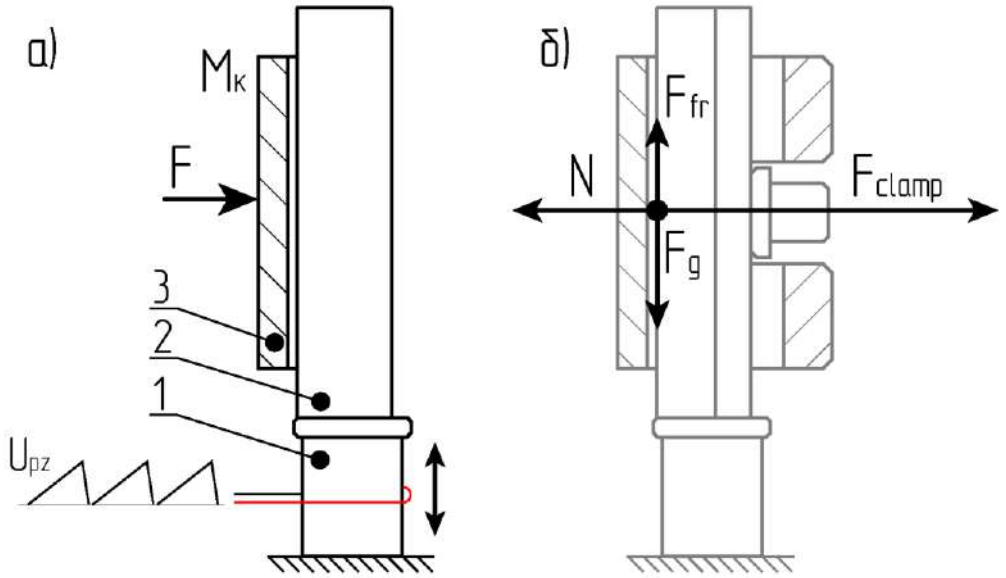



Рисунок 6. а) – принципиальная схема вертикального инерциального пьезопривода: 1 – пьезопакет, 2 – стержень, 3 – слайдер, Мк – масса слайдера, F – сила прижима слайдера к стержню, Upz – пилообразное напряжение, подаваемое на пьезопакет; б) – схема сил в инерциальном вертикальном пьезоприводе: Ffr – сила трения между стержнем и слайдером, Fclamp – сила прижима слайдера к стержню, N – сила реакции стержня на слайдер, Fg – сила тяжести, действующая на слайдер

В работе рассматривается вертикальный инерциальный пьезопривод, в котором на каретку вдоль оси движения действует только сила тяжести и сила трения, то его ускорение в инерциальной системе координат (ИСК) при движении вверх

$$a_{up} = \frac{F_{fr}}{m_{slider}} - g \tag{16}$$

и при движении вниз

$$a_{down} = \frac{F_{fr}}{m_{slider}} + g \tag{17}$$

так как сила трения равна

$$F_{fr} = \mu * N \tag{18}$$

где

$$N = F_{clamp} \tag{19}$$

то получается, что

$$a_{up} = \frac{\mu F_{clamp}}{m_{slider}} - g \quad (20)$$

и

$$a_{down} = \frac{\mu F_{clamp}}{m_{slider}} + g \quad (21)$$

где $m_{slider}$ – масса слайдера, $N$ – сила реакции опоры, $\mu$ – коэффициент трения, $g$ – ускорение свободного падения, $F_{clamp}$ – сила прижима, $F_{fr}$ – сила трения

Из этих выражений следует, что величина ускорения слайдера в ИСК ограничена. Таким образом, слайдер может двигаться вместе со стержнем (Stick фаза) вверх или вниз только при условии, что величина ускорения стержня не превышает пороговых значений $a_{up}$, или $a_{down}$, причем, как следует из выражений (20, 21), $a_{up} < a_{down}$. Если абсолютное значение ускорения стержня будет превышать пороговое значение, то возникнет проскальзывание слайдера по стержню (Slip фаза) [65, 66]. При проскальзывании у слайдера появляется скорость в неинерциальной системе координат (НИСК) относительно стержня, направленная в сторону, обратную ускорению стержня в ИСК. Во все моменты времени, когда стержень движется, сила трения, действующая на слайдер, является для него силой тяги. Этот факт важен для понимания характера движения слайдера.

На Рисунке 6а показана конструкция вертикального инерциального пьезопривода. В качестве пьезоэлемента используется пьезопакет Pst150/5x5/7H, размерами 5*5*7 мм и удлинением 8 мкм при 120 В. На пьезопакете (1) через тонкий слой эпоксидного клея жестко закреплен стержень (2). Каретка (3) держится на стержне за счет сил трения, вызванных реакцией на силу прижима каретки к стержню (F) фторопластовой шайбой (4). В поперечном сечении А-А стержень имеет треугольное сечение и контакт с кареткой происходит поверхностями, образующими прямой угол. Такая конструкция позволяет оставить каретке только одну степень свободы – вдоль оси стержня. Стержень и половинка каретки, которая участвует в трении изготовлены из титана ВТ1-0 ГОСТ 19807-74.

На пьезоэлемент подается несимметричный треугольный электрический импульс ($U_{pz}$), плавный фронт которого обеспечивает медленное вытягивание пьезоэлемента и стержня вместе с кареткой, а резкий фронт заставляет стержень резко переместится, при этом в силу инерции каретка проскальзывает по стержню. Последовательность этих импульсов заставляет каретку перемещаться относительно стержня вдоль всей его длины.

Вообще говоря, с энергетической точки зрения, для оптимальной работы пьезоактюатора в системе механического позиционирования необходимо, чтобы в пьезоактюаторе была запасена электростатическая энергия, достаточная для совершения механической работы по перемещению некоторой массы [9]:

$$\frac{CU^2}{2} = A = \int_0^t F(t)\, v(t) dt \quad (22)$$

где $C$ — электрическая емкость пьезоактюатора, $U$ — напряжение на пьезоактюаторе, $A$ – механическая работа по перемещению массы, $F(t)$ — сила, действующая на перемещаемую массу, $v(t)$ — скорость перемещения, $t$ — время перемещения.

В силу большой емкости пьезопакет способен накапливать большую электрическую энергию и развивать силу, достаточную для совершения работы по резкому перемещению стержня или плавному перемещению стержня с кареткой.

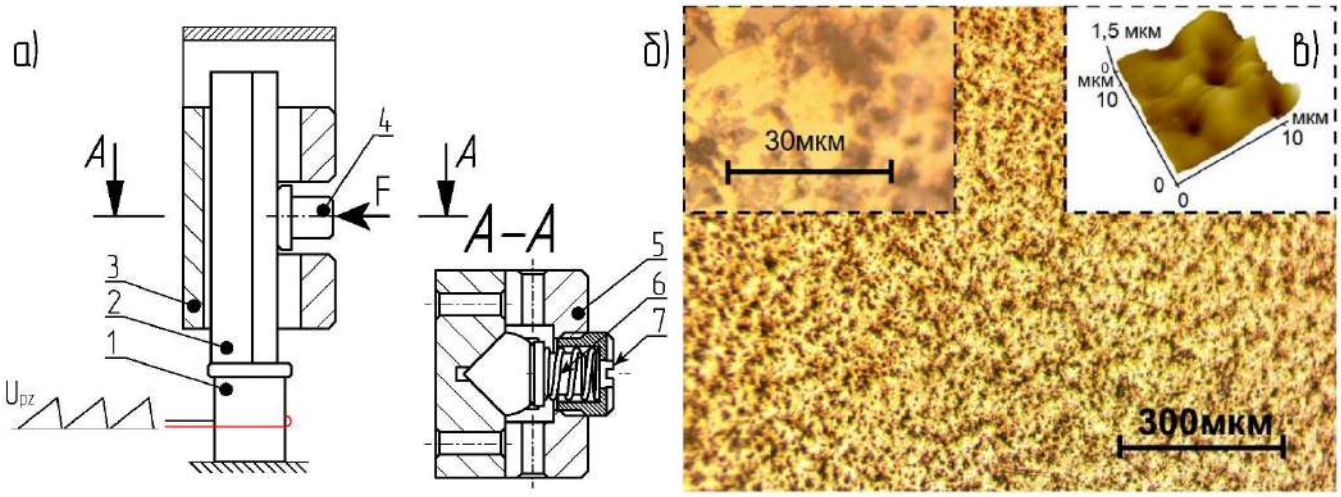



Рисунок 7. а – конструкция вертикального инерциального привода: 1 – пьезопакет, 2 – стержень, 3 – слайдер, 4 – прижимная втулка, 5 – корпус слайдера, 6 – прижимная пружина, 7 – прижимная гайка, F – сила прижима слайдера к стержню, Upz – пилообразное напряжение, подаваемое на пьезопакет; б – изображение поверхности трения в оптическом микроскопе; в – изображение поверхности трения в силовом микроскопе

На работу привода большое влияние оказывает качество поверхности трения каретки и стержня, а также сила прижима каретки к стержню. Оптимальными являются параметры, когда статический и динамический коэффициенты трения равны. Достигается это путем притирки каретки к стержню с использованием абразивных паст до текстуры поверхности, называемой «апельсиновой коркой» (Рисунок 7б) с шероховатостью менее Ra 0.8 Именно такие параметры поверхности трения позволяют максимально сблизить коэффициенты статического и динамического трения.

Конструкция вертикального инерциального привода показана на Рисунке 7а. Для настройки усилия прижима используется резьбовая втулка (7), вкрученная в вторую половинку каретки (5). На резьбовую втулку опирается пружина (6), поджимающая фторопластовую шайбу. При вращении резьбовой втулки пружина деформируется и изменяется усилие, с которым она прижимает фторопластовую шайбу к стержню.

**Схема управления инерциальным пьезоприводом**

Обычно для управления инерциальным пьезоприводом используют ЦАП, управляемый микроконтроллером. При помощи ЦАП можно задавать подходящую форму управляющего сигнала, но такая система достаточно сложна для такого

простого устройства. Мы предлагаем схему управления инерциальным приводом (Рисунок 8а), в которой пологий фронт импульса формируется за счет зарядки емкости пьезопакета через резистор, а резкий – путем замыкания контактов пьезопакета через транзистор.

Схема, показанная на Рисунке 8, получает на вход последовательность прямоугольных импульсов ($U_g$), которые поступают на затвор полевого транзистора $VT_1$. Когда входной сигнал равен +12В, то транзистор открыт и весь заряд пьезопакета стекает на землю через транзистор $VT_1$ и резистор $R_2$. Резистор $R_2$ имеет малое сопротивление (10 Ом), что позволяет емкости пьезопакета разрядиться максимально быстро ($\tau_2 = 7$ мкс). Когда входной сигнал становится равным 0В, транзистор закрывается и емкость пьезопакета заряжается через резистор $R_1$ до некоторого напряжения, определяемого временем открытия транзистора. Резистор $R_1$ имеет большое сопротивление (2кОм), что заставляет емкость пьезопакета заряжаться долго ($\tau_1 = 1400$ мкс. Так как время зарядки ограничено временем $t_1$, то пьезопакет заряжается не до напряжения U0, а до напряжения $U_{imp}$.

Время $t_2$ должно быть больше $\tau_2$, чтобы пьезопакет полностью втянулся и затухли колебания, которые возникают при резком перемещении стержня. От времени зарядки пьезопакета ($t_1$) зависит величина единичного шага, на который переместится каретка за один период управляющего импульса. Таким образом для управления приводом достаточно подать ШИМ сигнал, но вход схемы формирования управляющих импульсов, а скважность ШИМ сигнала будет задавать величину единичного шага, и, как следствие, скорость перемещения каретки.

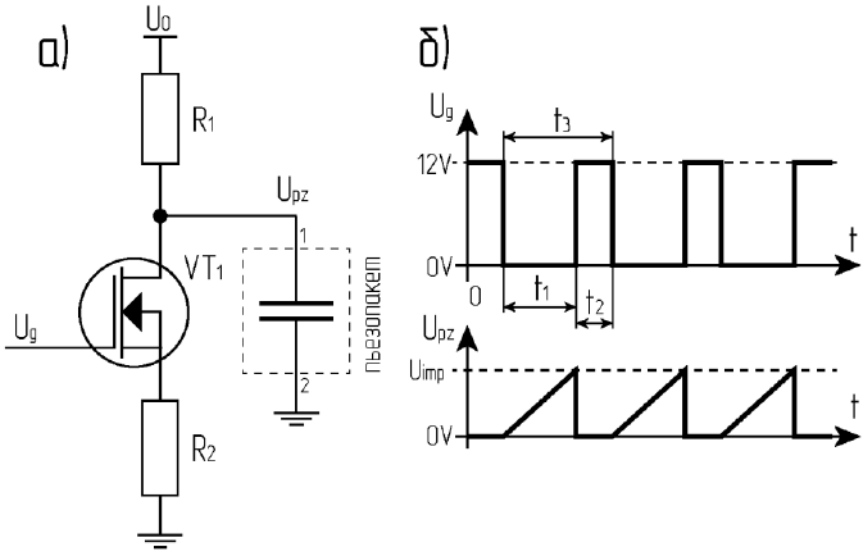



Рисунок 8. а - схема формирования управляющего импульса; б – осциллограмма входного и выходного сигналов схемы

Существует два способа изменения направления движения каретки:

1. Поменять подключение пьезопакета: контакт 2 подключить к схеме формирования сигналов, а контакт 1 заземлить;

2. Вторая схема формирования импульсов, подключенная к контакту 2 пьезопакета (Рисунок 9). В данном случае одновременно работает только одна схема формирования импульсов, а на второй в это время открыт транзистор, подключая пьезопакет к земле.

Важно отметить, что в обоих вариантах на пьезопакет будет подаваться напряжение, создающее напряженность электрического поля противоположное исходному направлению поляризации пьезопакета. Допустимое напряжение, исключающее деполяризацию используемых пьезопакетов, не должно превышать 30В.

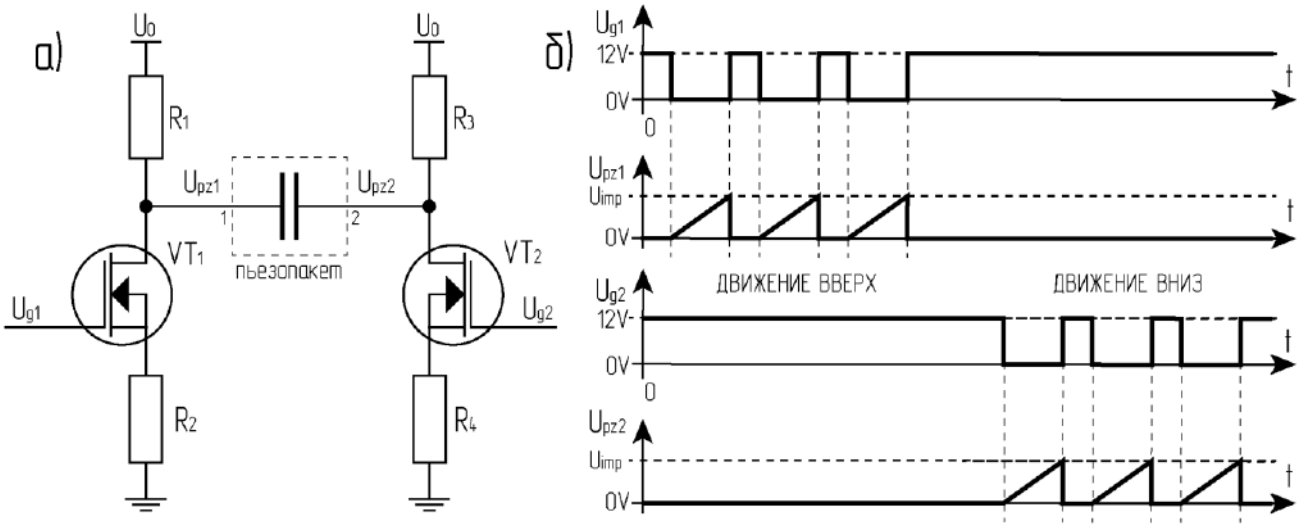



Рисунок 9. а – схема подключения пьезопакета с реверсом; б – осциллограммы сигналов в схеме подключения пьезопакета с реверсом

## 2.2. Цифровая модель инерциального пьезопривода

Для подбора оптимальных параметров пьезопривода была разработана его модель в программе COMSOL.

Для выбора размера ячеек сетки были использованы следующие критерии:

1. Размер ячейки не должен превышать 1/5 от размера длины упругой волны в данном материале.
2. Элементы модели, имеющие кривизну, после представления элементами сетки должны оставаться гладкими, без видимой угловатости.
3. После выполнения первых двух критериев необходимо выполнить исследование на сеточную сходимость, последовательно уменьшая размер элементов сетки и отслеживая величину ключевого параметра модели. В механических моделях в качестве такого параметра удобно использовать максимальное напряжение по Мизесу. При уменьшении размера сетки значение этого параметра не должно меняться более, чем на 2%.

Длина упругой волны в данном материале определяется скоростью и частотой звука:

$$\lambda = \frac{v}{f_0} \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

где $E$ – модуль Юнга материала, $\rho$ – плотность, $\nu$ – коэффициент Пуассона.

Для оценки величины скорости звука в пьезоматериале в направлении поляризации используется диагональный элемент матрицы жесткости $c33$.

Для построения сетки была проведена оценка длины звуковой волны λ в материалах, из которых построена модель: сталь, титан и пьезокерамика PZT 5H. Величины параметров материалов, используемых в модели инерциального пьезопривода, а также вычисленные по формулам (1), (2) значения скорости звука и длины волны приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Величины параметров материалов, используемых в модели

| **Материал** | **Плотность, кг/м$^3$** | **Модуль Юнга, ГПа** | **Отношение Пуассона** | **Скорость звука, м/с** | **λ, мм (*f0*=31 КГц)** | **λ/5, мм (*f0*=31 КГц)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Сталь | 7850 | 200 | 0.30 | 5850 | 189 | 38 |
| Пьезокерамика PZT 5H | 7500 | 117 (Приведено значение $c_{33}$ матрицы эластичности) | 0.31 | 4582 | 148 | 39 |
| Титан | 4505 | 112 | 0.32 | 5980 | 193 | 30 |

Для оценки собственной резонансной частоты пьезопривода был построен Фурье спектр графика затухающих колебаний перемещения слайдера и проведено исследование модели на собственные частоты. В обоих случаях было получено значение резонансной частоты f0 около 31 кГц.

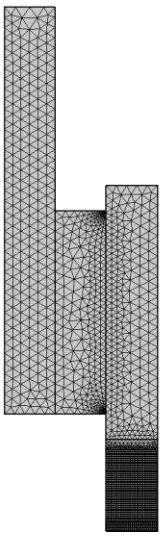


Рисунок 10. Базовая сетки модели инерциального пьезопривода в COMSOL

Размер элементов сетки не должен превышать величину λ/5, что в соответствии с данными, приведенными в таблице, удовлетворено для всех элементов модели, т.к. размер ячеек сетки не превышает единицы миллиметров.

Структура сетки (Рисунок 10) определена спецификой модели:

1. Для области пьезоактюатора построена структурированная сетка. Каждый слой пьезоактуатора разбит на 3 элемента по толщине. Параметром сетки является количество разбиений по горизонтали (по ширине пьезоактуатора) $N_h$.
2. Для всех остальных областей построена триангуляционная сетка, опорным размером для которой является размер элемента *MeshSize*.
3. На границе контакта стержня и слайдера размер элемента равен 0.5**MeshSize*.

Для определения размеров элементов сетки были проведены два исследования реакции системы на единичный импульс напряжения, в которых переменными параметрами являлись величины $N_h$ и *MeshSize*.

Вариант №1:

*MeshSize*=1 мм

Таблица 2. Результат исследования с *MeshSize*=1 мм

| $N_h$ | Шаг каретки, нм | Изменение шага, % | Количество элементов сетки |
|---|---|---|---|
| 2 | 205.0 | 9.3 | 2228 |
| 8 | 185.8 | 1.1 | 2620 |
| 16 | 183.7 | 0.1 | 2993 |
| 32 | 183.5 | - | 3807 |

На основании данных, приведенных в Таблице 2, в качестве рабочего взято значение $N_h$=8, т. к. последующие изменения параметра приводят к изменению шага каретки менее, чем на 1%

Вариант-№2:

$N_h$=8

Таблица 3. Результат исследования с $N_h$=8

| MeshSize, мм | Шаг каретки, нм | Изменение шага, % | Количество элементов сетки |
|---|---|---|---|
| 8 | 184.4 | 0.1 | 2446 |
| 4 | 184.6 | 0.2 | 2620 |
| 2 | 185.2 | 0.3 | 2993 |
| 1 | 185.8 | | 3807 |

В результате исследования варианта №2 получено, что изменение размера элемента сетки, построенной для областей стержня и каретки на величину шага каретки в данной модели практически не влияет. Основная причина заключается в том, что сопряжение стержня и каретки смоделировано как сосредоточенное призматическое соединение.

Чаще всего при моделировании упругих механических систем в COMSOL потери задаются демпфированием по Рэлею. Выбор этого метода обусловлен тем, что исследования моделей в работе выполняются как в частотной, так и во временной области при помощи пакета COMSOL, а для выполнения решения во временной области в COMSOL единственным допустимым способом задания потерь является именно демпфирование по Рэлею.

Для системы с несколькими степенями свободы при вычислениях методом конечных элементов уравнение движения записывается в матричной форме:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

где **M** — матрица масс, **C** — матрица демпфирования, **K** — матрица жёсткости, **u** (t) — вектор перемещений точек узлов расчетной сетки, **F** (t) — вектор внешних сил.

При использовании Рэлеевского демпфирования матрица демпфирования **C** в уравнении движения представлена как линейная комбинация матриц масс **M** и жёсткости **K**.

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (4)$$

где α – коэффициент массового демпфирования, $\beta$ – коэффициент демпфирования по жесткости

Параметр α влияет на низкие частоты, параметр $\beta$ — на высокие.

Для каждой колебательной моды n с частотой $f_n$ коэффициент демпфирования ζn связан с коэфффициентами α и β при помощи соотношения:

$$\zeta_n = \frac{\alpha}{2w_n} + \frac{\beta w_n}{2} \quad (5)$$

где $w_n = 2\pi f_n$

Для того, чтобы определить α и $\beta$ и настроить величину потерь по Рэлею в модели, заданы коэффициенты демпфирования $\zeta_1$, $\zeta_2$ на двух разных частотах.

Коэффициент демпфирования $\zeta$ связан с добротностью системы Q соотношением:

$$\zeta = \frac{1}{2Q} \quad (6)$$

Во всех доменах модели инерциального пьезопривода используются одинаковые коэффициенты демпфирования, определенные на основании экспериментально полученной резонансной кривой. Колебания в приводе (Рисунок 11) возникают из-за того, что привод – это электро-пьезо механическая колебательная система, в которой присутствует циркуляция энергии из электрической в механическую и обратно.

а) б)

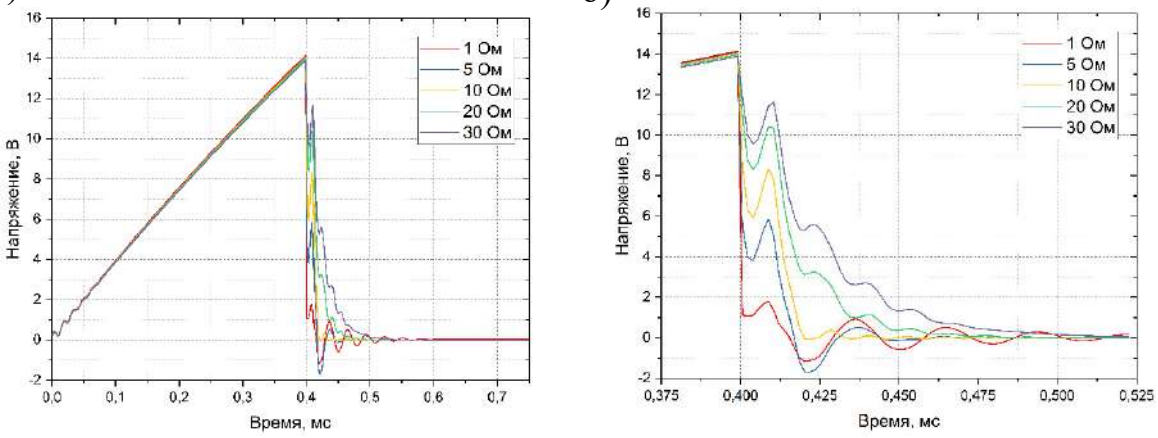



Рисунок 11. Форма импульса управляющего напряжения при различных сопротивлениях R2. а) – весь импульс, б) – растянутый во времени задний фронт импульса

Для подавления этих колебаний были увеличены потери в электромеханическом контуре путем установки резистора R2 в электрическую цепь разрядки пьезопакета. В результате удалось подобрать оптимальное сопротивление 10 Ом, при котором наблюдается максимальное демпфирование электрических (Рисунок 11) и механических (Рисунок 12) колебаний в электромеханическом приводе, и достигается максимальная величина шага перемещения слайдера относительно неподвижного стержня (Рисунок 12б).

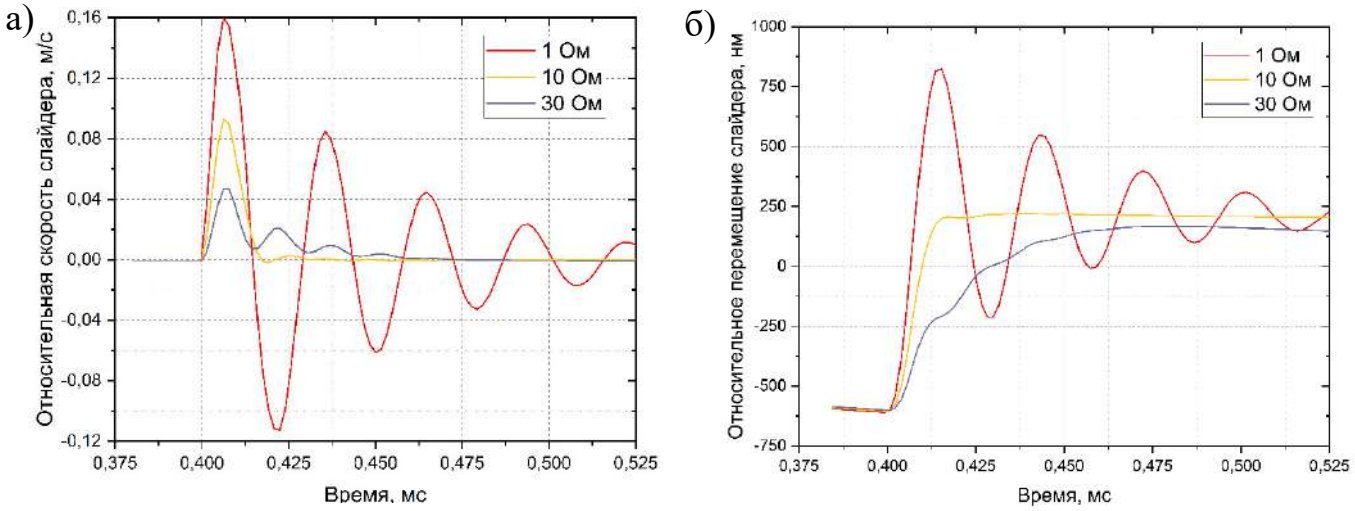



Рисунок 12. Скорость (а) и перемещение (б) слайдера в не инерциальной системе координат относительно неподвижного стержня при различных сопротивлениях R2.

## 2.3. Экспериментальные исследования инерциального пьезопривода, сравнение с модельными расчетами

### Схема измерения величины шагов

Экспериментальные исследования инерциального пьезопривода проводились путем измерения величины шагов при разных настройках и параметрах системы. Для измерения шагов использовался силовой сканирующий микроскоп (ССМ). Схема установки для измерения шагов с использованием ССМ показана на Рисунке 13. Исследуемый привод использовался как система сближения зонда с образцом. В качестве датчика использовался пьезорезонансный трубчатый датчик силового взаимодействия с зондом из вольфрамовой проволоки. Осциллограф использовался для измерения формы управляющего импульса.

Измерения производились в следующей последовательности: сначала зонд подводился к образцу до захвата взаимодействия между ними. Сканер Z втягивался и ЛИД совершал один шаг, после чего сканер Z вытягивался до захвата взаимодействия между зондом и образцом. Разница, между значением сигнала Z до шага и после (измеренная при помощи АЦП) принималась за размер этого шага и записывалась в файл. Эти шаги повторялись во всем диапазоне сканера Z. В результате измерения получался график значения измеренного сигнала Z от порядкового номера шага, показанный на Рисунке 14а. По этим данным строилась гистограмма распределения

шагов, показанная на Рисунке 14б. Из-за влияния силы тяжести шаги, измеренные при движении вверх и вниз, обрабатывались отдельно.

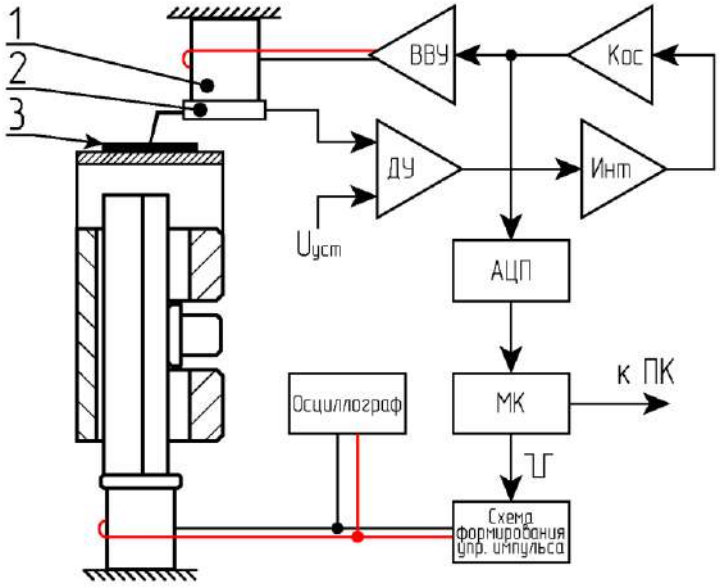



Рисунок 13. Схема измерения шагов привода в ССМ. 1 – пьезосканер Z; 2 – датчик силового взаимодействия с зондом в виде вольфрамовой иглы; 3 – плоский образец; ВВУ – высоковольтный усилитель; Кос – усилитель ОС; Инт – интегратор; ДУ – дифференциальный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; Uуст – опорное напряжение петли ОС

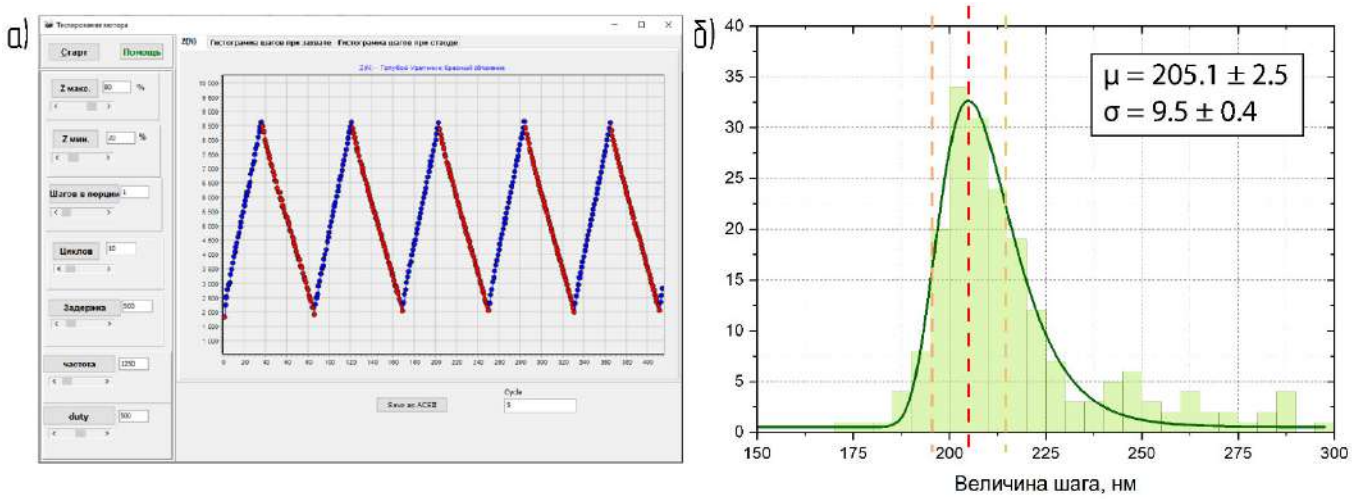



Рисунок 14. а – окно программы для измерения шагов; б – гистограмма распределения шагов и ее аппроксимация

Затем полученная гистограмма аппроксимировалась функцией плотности вероятности Гумбеля и по ней определялись математическое ожидание (μ) и среднеквадратичное отклонение (σ) распределения шагов.

## Измерение зависимости формы импульса и средней величины шагов от времени $t_1$

При зарядке пьезопакета напряжение на нем изменяется по экспоненциальному закону. Так как время зарядки $t_1 \ll \tau_1$, то, с определённой погрешностью, можно

считать, что максимальное напряжение импульса Uimp линейно зависит от времени $t_1$. При помощи осциллографа были получены графики зарядки пьезопакета во времени при разном значении $t_1$, показанные на Рисунке 15, и определены значения $U_{imp}$для каждого значения $t_1$. В дальнейшем для штатного режима работы привода было выбрано время $t_1$=400 мкс, которому соответствует $U_{imp}$=13.10В.

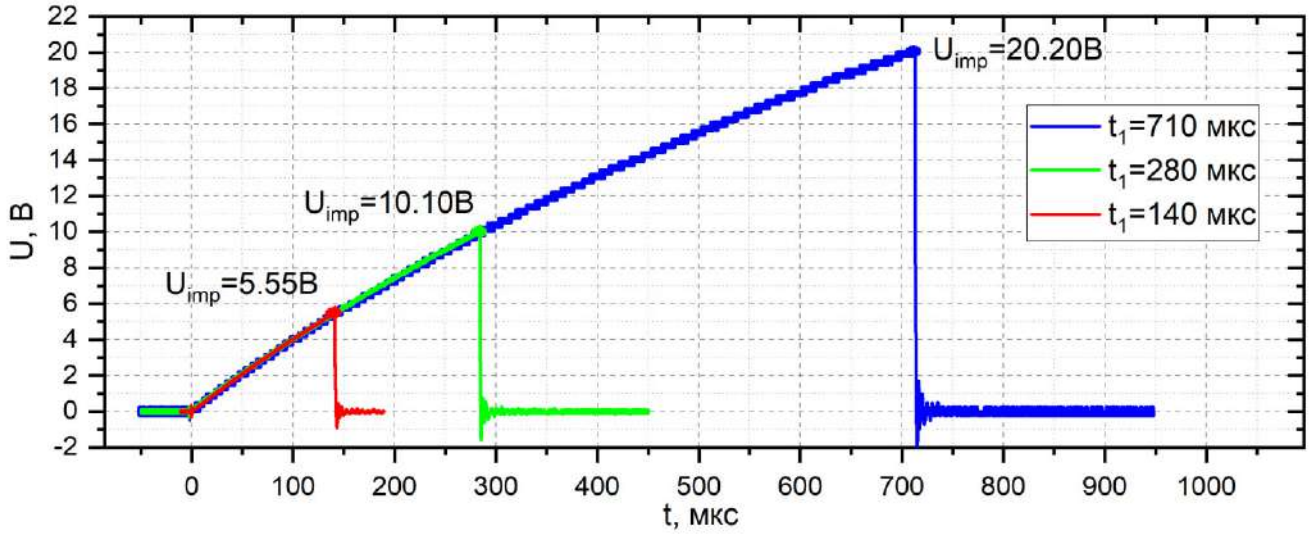



Рисунок 15. Осциллограммы напряжения на пьезопакете при разных значения $t_1$

Для значений $U_{imp} = 5.55$ В и $U_{imp} = 13.10$ В были получены гистограммы распределения шагов, показанные на Рисунке 16. При напряжении $U_{imp} = 5.55$ В значение шага составило 67.4±2.5 нм, а при $U_{imp} = 13.10$ В – 205.1±2.5 нм.

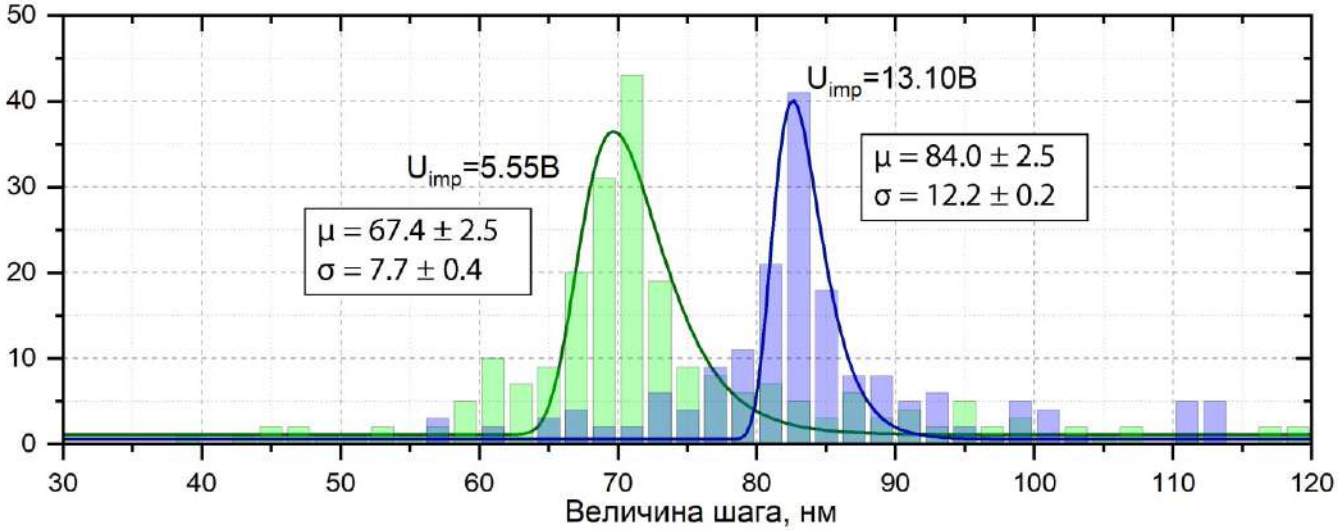



Рисунок 16. Гистограммы шагов при $U_{imp} = 5.55$ В (левый пик) и $U_{imp} = 13.10$ В (правый пик)

Время вытягивания $t_1$ невозможно уменьшать бесконечно с целью достижения минимального шага, так как существует значение $t_1$, после которого величина шага резко уменьшается, и каретка перестает двигаться. Это связано с гистерезисом в зависимости смещения пьезопакета от приложенного электрического напряжения.

Зависимость величины шага от значения $t_1$ показана на Рисунке 17. По этому графику видно, что при значении $t_1$ меньше 50 мкс каретка перестает двигаться.

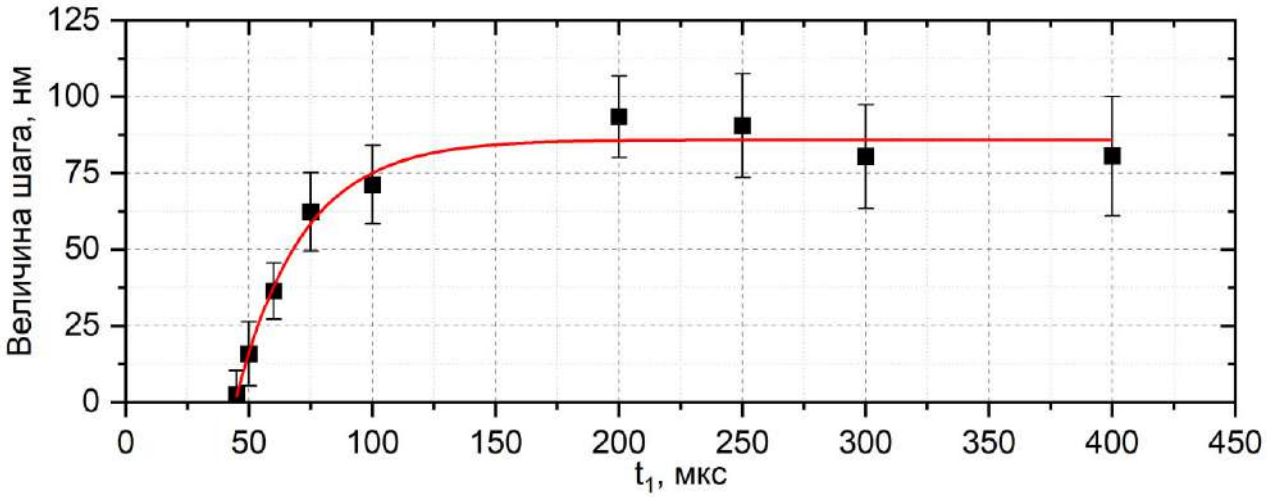



Рисунок 17. График зависимость среднего шага от времени $t_1$

## Измерение зависимости средней величины шагов от времени $t_2$

Если рассмотреть осциллограмму управляющего импульса на резком фронте, то можно обнаружить затухающие осцилляции напряжения, вызванные электропьезомеханическими колебаниями упругой системы пьезопакет-стержень. Эти колебания ограничивают минимальное значение паузы между импульсами $t_2$, так как требуется время на их затухание, иначе они негативно сказываются на величине следующего шага. Если начать вытягивание стержня до того, как затухнут паразитные колебания, то каретка будет проскальзывает относительно стержня (ввиду своей инерционности) и при вытягивании стержня пройдет меньший путь, а следовательно, и меньший шаг за один период управляющего импульса. На Рисунке 18 представлена зависимость величины шага от времени $t_2$.

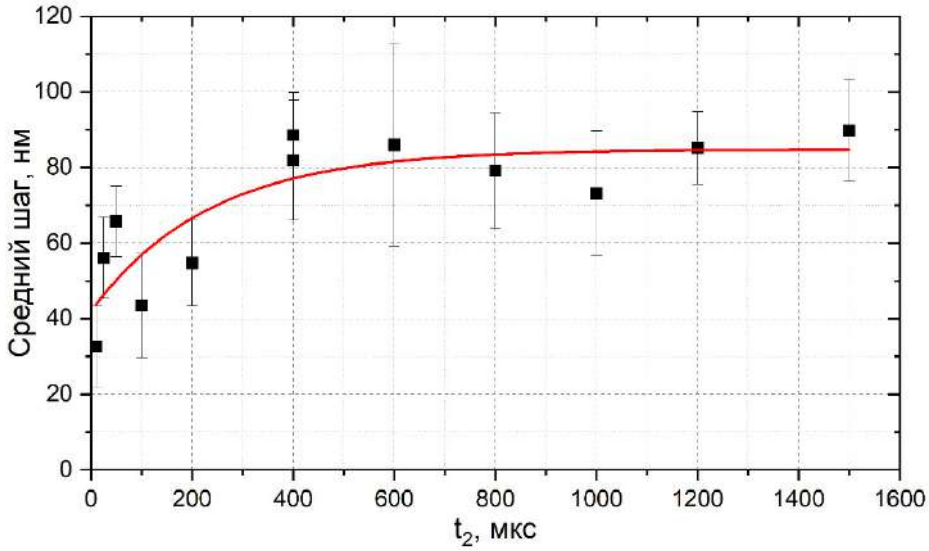



Рисунок 18. График зависимости величины среднего шага от времени $t_2$

**Измерение зависимости величины шага от значения сопротивления $R_2$**

На резком фронте управляющего импульса в упругой системе пьезопакет-стержень появляются колебания. Осцилляции напряжения на пьезопакете в момент этих колебаний показаны на Рисунке 19. Для сравнения на этом же графике показаны осцилляции напряжения на керамическом конденсаторе той же емкости, как и пьезопакет. По осциллограмме видно, что на конденсаторе имеется выброс напряжения, связанный с индуктивностью проводов, которыми подключен пьезопакет, образуя LC колебательный контур и свойствами керамики, используемой в конденсаторах. Осциллограмма пьезопакета напротив имеет колебания, которые затухают гораздо дольше и имеют в своем составе несколько частот. Вызваны эти колебания и LC цепочкой, как в случае с простым конденсатором, и колебаниями стержня на пьезопакете, который выступает в роли упругого элемента с конечной жесткостью. Эти колебания негативно влияют на величину шага, если вытягивание пьезопакета для следующего шага начинается до того, как они затухнут. Для того, чтобы исключить такое влияние, время $t_2$должно быть больше, чем время затухания этих осцилляций.

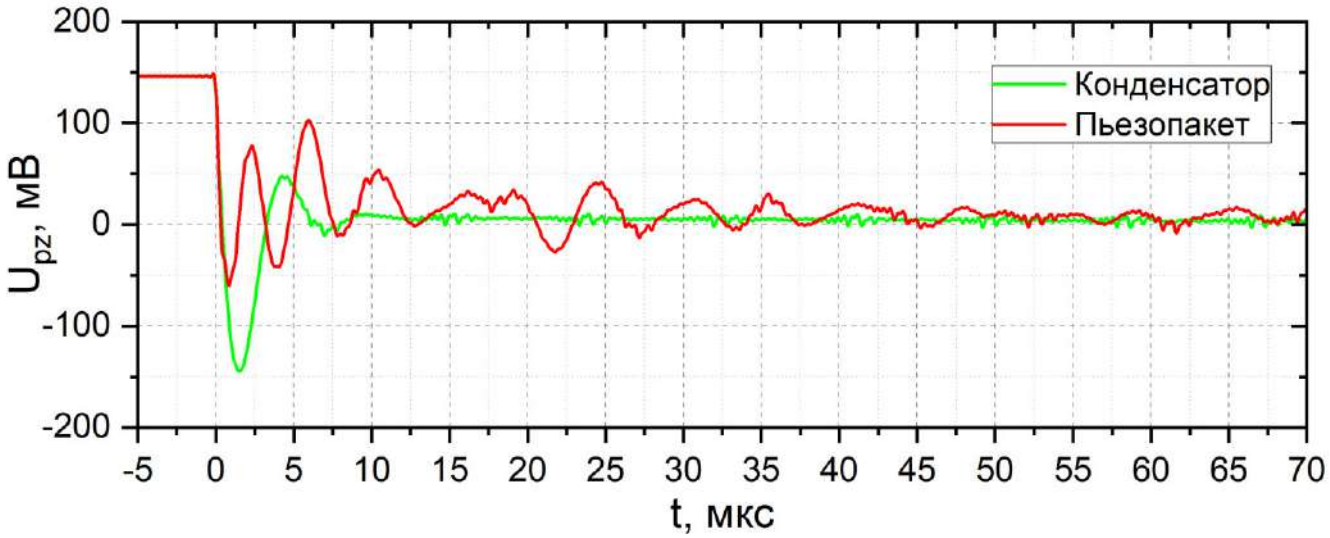



Рисунок 19. Осциллограмма напряжения на конденсаторе и пьезопакете при одинаковом управляющем импульсе

Один из способов подавления этих колебаний – уменьшение добротности электропьезомеханической колебательной системы путем увеличения электрических потерь в цепи разрядки пьезопакета. Для этого в цепь разрядки пьезопакета включен резистор $R_2$. Зависимость величины шага от значения сопротивления резистора $R_2$показана на Рисунке 20.

Видно, что у этой зависимости есть экстремум, соответствующий значению $R_2$ около 13 Ом. При большем значении $R_2$ скорость разрядки пьезопакета уменьшается слишком сильно, так что каретка меньше проскальзывает по стержню и возвращается в исходное положение вместе со стержнем. При малом $R_2$, вследствие высокой добротности электромеханического вибратора, возникают колебания пьезопакета со

стержнем и слайдер (каретка) проскальзывает по стержню в разные стороны, что уменьшает величину одиночного шага перемещения.

На Рисунке 20 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных зависимостей величины шага от величины сопротивления $R_2$, полученных в среде COMSOL Multiphysics. Количественное расхождение между теоретической кривой и опытными данными обусловлено упрощениями, принятыми при построении физической модели, в частности, в части описания фрикционного взаимодействия между стержнем и слайдером. Несмотря на это, прослеживается четкое качественное соответствие: обе зависимости имеют ярко выраженный экстремум, что подтверждает наличие оптимального значения сопротивления $R_2$, при котором достигается максимальная величина шага.

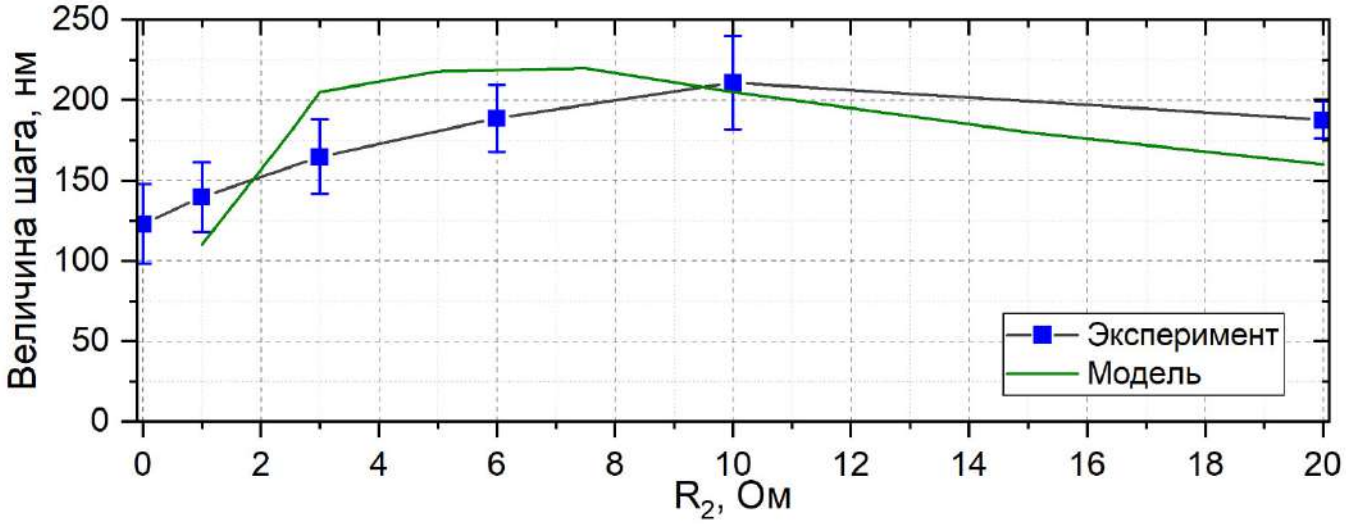



Рисунок 20. График зависимости величины шага от значения сопротивления $R_2$

## Измерение зависимости величины шага от усилия прижима каретки к стержню

Экспериментально получена зависимость средней величины шага от усилия прижима каретки к стержню. По графику (Рисунок 21) видно, что недостаточный прижим приводит к «сползанию» каретки при движении вниз, а максимальный прижим, при котором сохраняется подвижность привода позволяет уменьшить разброс величины шагов, что приводит к более стабильной работе привода.

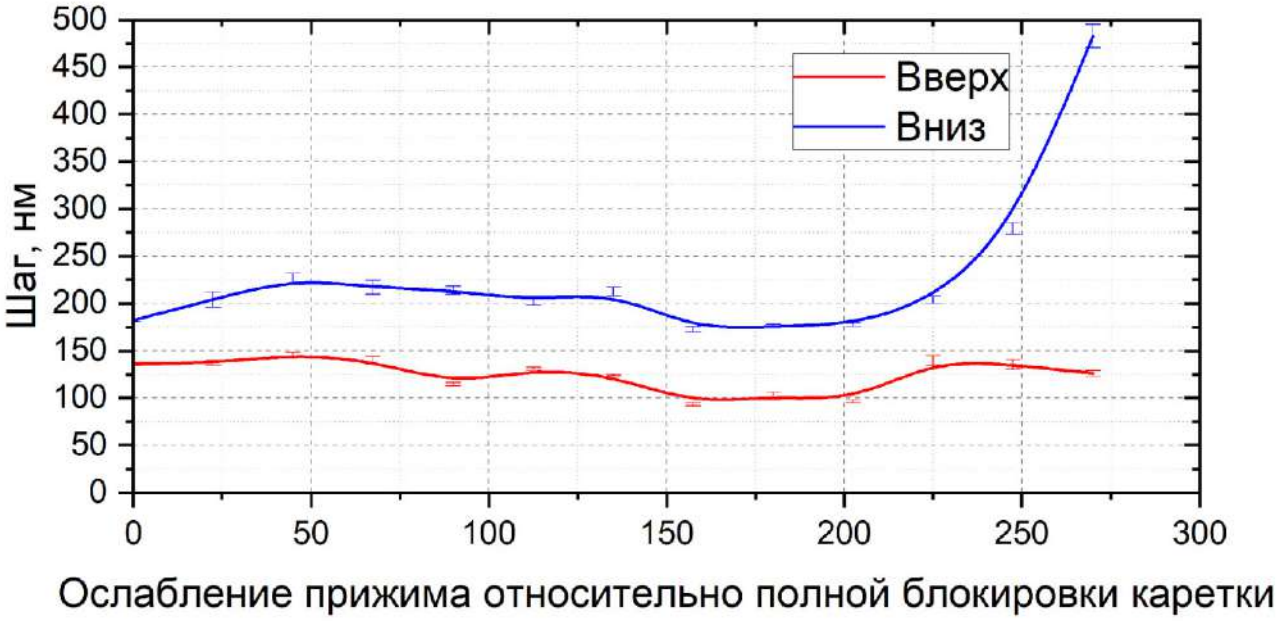



Рисунок 21. График зависимости средней величины шага от усилия прижима каретки к стержню. За «0» принято состояние максимального прижима каретки к стержню

## 2.4. Выводы

Использование инерциального принципа движения позволяет создать компактный узел сближения зонда с образцом в диапазоне ~10 мм с изменяемым шагом ~100нм. Эффективным актюатором в инерциальном двигателе является пьезопакет, электрическая емкость которого позволяет запасти необходимую для перемещения энергию. Управление работой инерциального двигателя можно осуществлять с помощью простой схемы на одном транзисторе путем медленной зарядки и быстрой разрядки емкости пьезопакета. Изменение времени зарядки пьезопакета позволяет изменять шаг перемещения каретки относительно стержня.

Стабильность величины шагов пьезоинерциального двигателя определяется структурой поверхностей трения. Экспериментально установлено, что для стабилизации величины шага перемещения необходимо сближать статический и динамический коэффициенты трения и использовать зернистую поверхность трения типа «апельсиновая корка» Предложенная пьезоэлектромеханическая модель привода продемонстрировала возникновение паразитных колебаний, возникающих при резком разряде пьезопакета и дестабилизирующих работу привода. Теоретически и экспериментально показано, что существует оптимальное значение электрических потерь в электропьезомеханической колебательной системе, при которых, с одной стороны, условия для инерциального принципа перемещения сохраняются, а, с другой стороны, вредные колебания гасятся.

**Положение, выносимое на защиту:**

В инерциальном линейном шаговом двигателе с пьезоактюатором, работающем по механизму «проскальзывание-залипание», необходимо обеспечить оптимальное значение потерь в колебательной системе путем подбора электрического

сопротивления в цепи разряда пьезоактюатора, при которых, с одной стороны, демпфируются колебания, дестабилизирующие работу двигателя, а, с другой стороны, ускорение стержня в момент разряда пьезопакета достаточно для возникновения фазы «проскальзывание».

# Глава 3. Система сканирования с динамическим демпфированием колебаний.

Система сканирования является ключевым элементом любого сканирующего зондового микроскопа (СЗМ), определяющим его разрешение и скорость. В общем виде системы позиционирования для разных типов СЗМ имеют схожую архитектуру и состоят из прецизионных актуаторов (как правило, пьезоэлектрических), обеспечивающих перемещение зонда или образца по трем координатным осям (X, Y, Z). Однако каждый метод накладывает свои специфические требования на конструкцию. В случае СИПМ, являющейся объектом нашего исследования, эти требования особенно жестки. Во-первых, сканирование ведется стеклянной нанопипеткой, заполненной электролитом, что требует специальных мер по ее надежному креплению и виброизоляции. Во-вторых, для сканирования в hopping моде требуется увеличивать резонансную частоту сканера Z, чтобы обеспечить быстрое перемещение нанопипетки и минимизировать паразитные колебания. В-третьих, область сканирования часто составляет десятки микрометров, что требует большого хода сканера по осям X и Y. В данной работе основное внимание уделяется оси Z, так как именно колебания вдоль этой оси вносят наибольшие искажения при быстром сканировании рельефа.

## 3.1. Принцип работы и конструкция сбалансированного сканера

Как уже говорилось в Главе 1 эффективным методом подавления низкочастотного резонанса является балансировка сканера Z. Конструкция сбалансированного сканера, реализованная в [67], показала значительное увеличение быстродействия СИПМ. В рамках нашей работы была предпринята попытка создания аналогичного макета сканера, однако, как показали предварительные тесты, он не продемонстрировал ожидаемых результатов по демпфированию резонансов. В связи с этим возникла необходимость детального исследования проблемы балансировки, включая как численное моделирование, так и экспериментальную верификацию. Именно этому и посвящена настоящая глава.

На Рисунке 22 представлена исходная конструкция пьезосканера, в которой пьезопакеты (6) установлены между двух упругих мембран (2,7), выполненных из листового металла с прорезями, обеспечивающими жесткость, необходимую для их прогиба при работе пьезопакетов. Мембраны имеют одинаковую жесткость поэтому при удлинении пьезопакетов их центр масс остается неподвижен, так как деформируются обе мембраны в противоположные стороны. В конструкции использованы пьезопакеты МТР150/5×5-2/9, размером 5*5*9 мм^3 с отверстием Ø2 по центру. Номинальное удлинение пьезопакета при 120В составляет 8 мкм. Поскольку мембраны деформируются в противоположные стороны, результирующее перемещение нанопипетки в два раза меньше удлинения пьезопакетов. Для

сохранения диапазона перемещения использовано два пьезопакета, установленные друг на друга и подключенные к высоковольтному усилителю параллельно.

## 3.2. Цифровая модель сбалансированного сканера

На основе исходной конструкции (Рисунок 22), была создана ее цифровая модель и проведено моделирование деформаций и расчет амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) в зависимости от точек крепления корпуса сканера к кронштейну и кронштейна к общему корпусу прибора и размеров отдельных элементов.

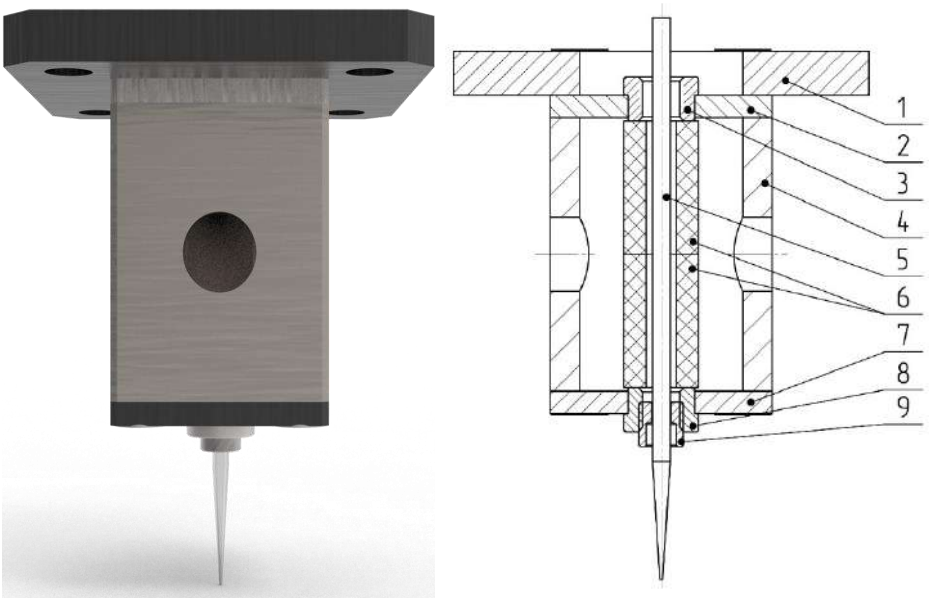



Рисунок 22. Исходная конструкция сканера. 1 – кронштейн, 2,7 – мембрана, 3,8 – втулка, 4 – корпус сканера, 5 – нанопипетка, 6 – пьезопакеты, 7 – резьбовая втулка, приклеенная к пипетке

Для моделирования в программе COMSOL были использованы следующие физические модули: механика твердых тел, электростатика с мультифизической связкой, пьезоэлектрический эффект.

В модели пьезоактуатор (ПА) задавался в виде многослойного пьезопакета, составленного из 82 плоских параллельно соединенных пьезоэлементов толщиной 0.15 mm из пьезокерамики PZT-5H (Lead Zirconate Titanate). С двух противоположных торцов ПА прикреплялся к корпусу через упругие металлические мембраны. Путем расчёта подбиралась такая толщина мембран, чтобы упругая сила, возникающая при их деформации, не превышала блокирующую силу пьезопакета. Для полного описания пьезоэлектрического эффекта, как и в работе [68], выбиралась взаимосвязь между поляризацией материала и его деформацией в форме “напряжение-заряд” (stress-charge):

$$T_{i,j} = \sum_{k,l} c_{E_{ijkl}} S_{kl} + \sum_{k} e^{t}_{ijk} E_k \qquad (7)$$

$$D_i = \sum_{j,k} e_{ijk} S_{jk} + \varepsilon_0 \sum_j \varepsilon_{rS_{ij}} E_j \qquad (8)$$

где T - тензор механических напряжений, S- тензор деформаций, E- вектор напряженности электрического поля, D – вектор поляризации, $c_E$ — это жесткость материала, e характеристики взаимосвязи, $\varepsilon_{rS}$ - относительная диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации, $\varepsilon_0$ - диэлектрическая проницаемость вакуума. Величины $c_E$, e, $\varepsilon_{rS}$ являются тензорами 4, 3 и 2-го ранга соответственно, и могут быть представлены в виде матриц.

Численное значение элемента $e_{33}$ в матрице взаимосвязей e (Elasticity matrice), определяющее величину деформаций в направлении поляризации пьезоматериала, выбиралось таким, чтобы чувствительности модельного и реального ПА были одинаковыми (растяжение на 16 μm при напряжении 120 V).

Конструкция сканера, представленная на Рисунке 23а. была импортирована в модель COMSOL непосредственно из CAD-файла. В расчеты для всех материалов конструкции, кроме ПА, заложены параметры конструкционной стали.

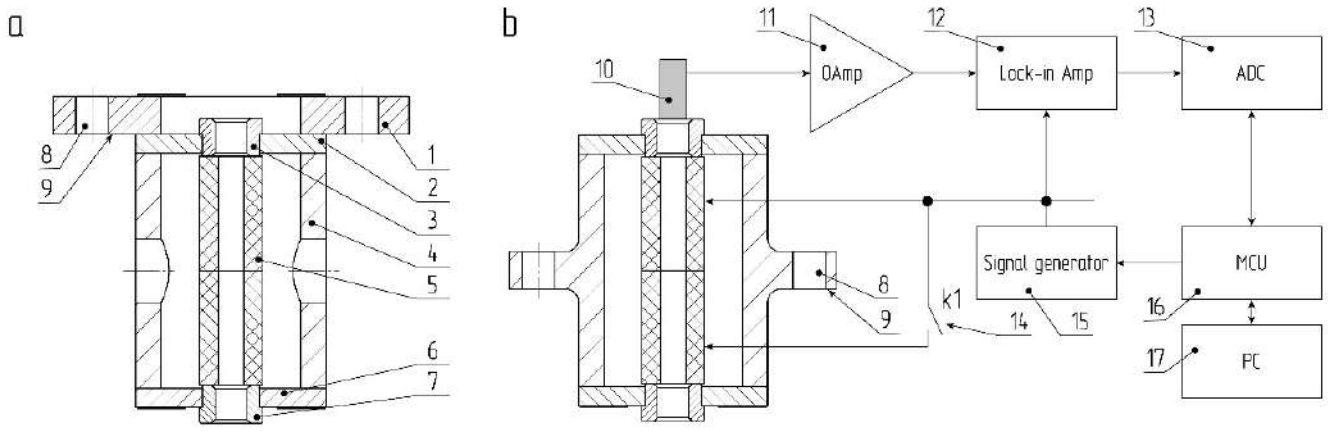



Рисунок 23. Модели сканера с неподвижным положением центра масс и разными вариантами крепления корпуса. a) исходный вариант с несимметричным закреплением корпуса с одного края: 1 – крепежный фланец, 2, 6 – мембрана, 3, 7 – втулка, 4 – корпус сканера, 5 – ПА, составленный из двух пьезопакетов, 8 – отверстие для крепления сканера, 9 – плоскость крепления сканера; b) симметричный вариант с закреплением по плоскости зеркальной симметрии корпуса и схемой измерения АЧХ: 10 – датчик, 11 -– предусилитель сигнала, 12 - синхродетектор, 13 - АЦП, 14 – переключатель для отключения второго пьезопакета, 15 – генератор сигналов, 16 - микроконтроллер, 17 - компьютер

Граничные условия назначались, исходя из способа закрепления сканера в реальном эксперименте. В отверстиях для болтов (8) назначено граничное условие “шарнир”, а на плоскости крепления сканера (9) установлено граничное условие “роллер”. Поскольку жесткость фланца много больше жесткости мембран, и он закреплен на массивном основании, то его деформацию в процессе работы можно не учитывать. На этом основании в модели также не рассматривается контакт головок крепежных винтов с фланцем и контакт фланца с основанием.

В Главе 2. «Инерциальный шаговый пьезоэлектрический привод» были приведены результаты расчета скорости звука v в стали и пьезокерамическом материале PZT 5. Величины параметров материалов, используемых в модели сканера, а также длины волн, приведены в Таблице 1.

Таблица 4. Величины параметров материалов, используемых в модели

| **Элемент модели** | **Материал** | **Плотность, кг/м$^3$** | **Модуль Юнга, ГПа** | **Отношение Пуассона** | **Скорость звука, м/с** | **Длина волны, мм** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Корпус | Сталь | 7850 | 200 | 0.30 | 5850 | 325 |
| Пьезосканер | Пьезокерамика PZT 5H | 7500 | 117 (Приведено значение $c_{33}$ матрицы эластичности) | 0.31 | 4582 | 255 |

Модель пьезосканера состоит из корпуса и двух пьезоактуатора, каждый из которых составлен из 41 слоя пьезокерамики. Толщина каждого слоя 0.17 мм. В рассматриваемой модели возбуждение пластин пьезоактуатора происходит в направлении поляризации (Z). Для пьезоактуатора построена структурированная сетка, где каждый слой по толщине (в направлении поляризации) состоит из 3-х элементов. Т.к. из приведенных значений скорости звука в материале PZT следует, что длина волны в пьезоэлектрическом материале в направлении поляризации на рабочей резонансной частоте 18000 Гц приблизительно 250 мм, условие №1 удовлетворено.

Корпус сканера имеет геометрические размеры 10x20 мм и изготовлен из конструкционной стали. Длина волны в стали $\lambda_{steel}$, определенная по формуле (1) для рабочей частоты f0=18000 Гц составляет 325 мм. Следовательно, максимальный размер сетки корпуса не должен превышать $\lambda_{steel}/5$, что составляет более 60 мм. Таким образом, выполнение условия первого критерия удовлетворяется автоматически из-за размеров модели.

Округлые элементы разрешены достаточно подробно, что продемонстрировано на Рисунке 24. Количество элементов сетки 150870.

а) б)

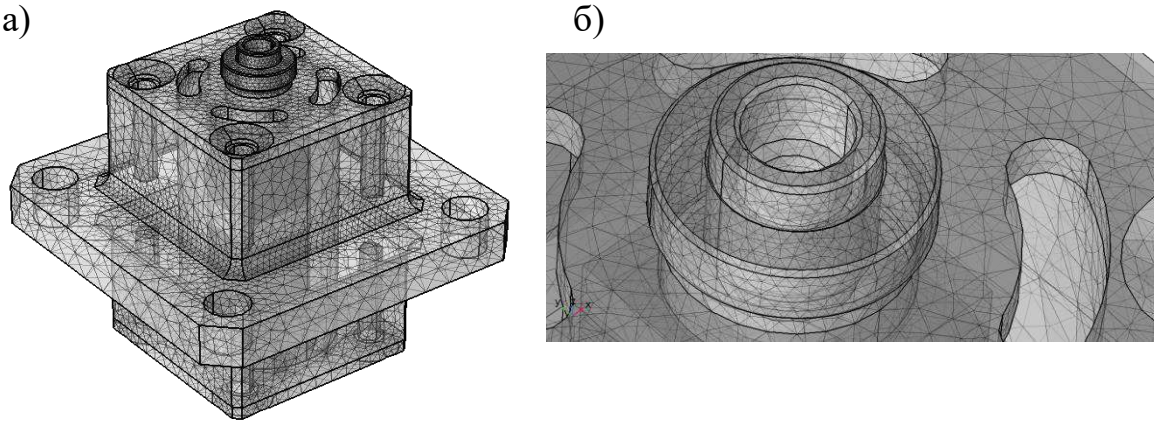


Рисунок 24. а) – Базовая сетка сканера, полученная в программе COMSOL; б) – фрагмент базовой сетки на округлых элементах модели

Для выполнения 3-го условия было выполнено сравнение расчета модели с использованием базовой (принятой в качестве рабочего варианта) и более мелкой сетки. При проведении частотного исследования с рабочим вариантом сетки было получено, что максимальная величина напряжений в модели на резонансной частоте составляет $5.45x10^8$ Н/м2. Коэффициент уменьшения элементов сетки принят K=0.8. При этом количество элементов стало равным 190754. Выполнение частотного исследования с измельченной сеткой дало в результате максимальную величину напряжений в модели на резонансной частоте $5.4x10^8$ Н/м2, что меньше результата, полученного на рабочей сетке на 1% (Таблица). Таким образом, показано, что используемый в модели рабочий вариант сетки адекватен при решении поставленной задачи.

Таблица 5. Сравнение результатов моделирования

| | **Коэффициент размера элементов** | **Количество ячеек сетки** | **Максимальное значение напряжений по Мизесу в модели частоте резонанса, Н/м$^2$** |
|---|---|---|---|
| Рабочая сетка | 1 | 150870 | $5.45\times10^8$ |
| Сгущенная сетка | 0.8 | 190754 | $5.40\times10^8$ |

В модели сканера для области многослойного пьезоактуатора установлена добротность, равная 400, в соответствии с измерениями, проведенными для отдельно взятого пьезоактуатора. Величина потерь в стальном корпусе установлена таким образом, чтобы добротность всей системы соответствовала экспериментальной добротности сканера, равной 40.

Методом конечных элементов проведено моделирование колебаний и оптимизация элементов конструкции. В процессе моделирования исходной конструкции сканера обнаружена «паразитная» деформация корпуса сканера (Рисунок 25), вызывающая ярко выраженный низкочастотный резонанс. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такого сканера показана на Рисунке 26 пунктирной линией.

Плохое демпфирование резонанса в исходной конструкции сканера связано с деформацией корпуса (4) и, как следствие с разными силами сжатия, действующими на ПА (5) сверху и снизу, которые вызывают смещение положения центра масс. Деформация корпуса показан на Рисунке 25.

Для устранения влияния обнаруженной деформации плоскость закрепления сканера перенесена на его геометрический центр. На Рисунке 26 сплошной линией представлена расчетная АЧХ сканера, соответствующая симметричному расположению кронштейна. Видно, что при таком креплении сканера к корпусу прибора, имеет место заметное демпфирование резонансных колебаний. Таким образом, как показывает моделирование, подбирая положение плоскости крепления корпуса сканера к корпусу прибора, можно минимизировать влияние деформации корпуса сканера, и, как следствие, сбалансировать положение центра масс.

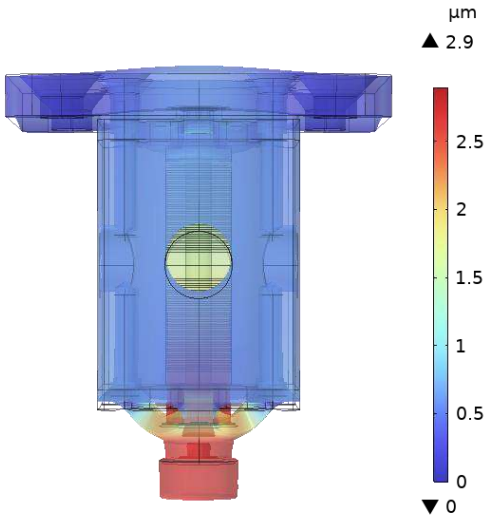



Рисунок 25. Деформация корпуса консольно закрепленного сканера

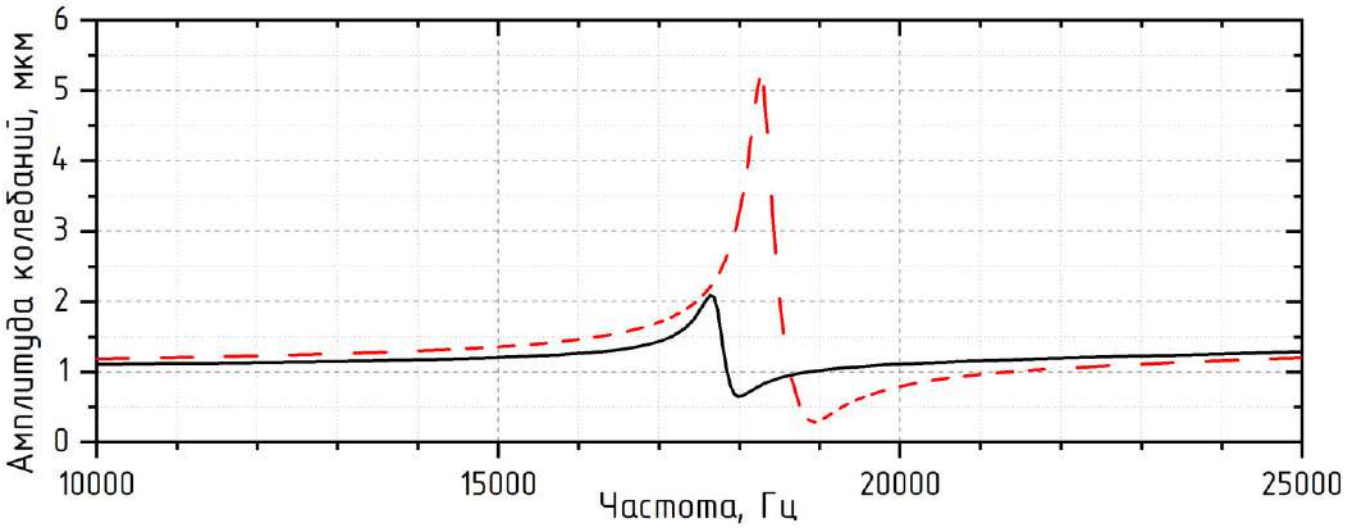



Рисунок 26. Сравнение АЧХ моделей сканеров, закрепленных, с одной стороны, как в исходной конструкции (красная пунктирная линия) и симметрично (черная сплошная линия)

Толщина мембран и форма вырезов (Рисунок 27) подбиралась в процессе моделирования, исходя из параметров жесткости и блокирующей силы пьезопакетов. Для используемых пьезопакетов блокирующая сила составляет 800 Н, а жесткость 100 Н/мкм.



Рисунок 27. Внешний вид мембраны сканера

При моделировании было получено распределение напряжений по Мизесу при деформации сканера и распределение перемещения подвижных элементов сканера (Рисунок 28).

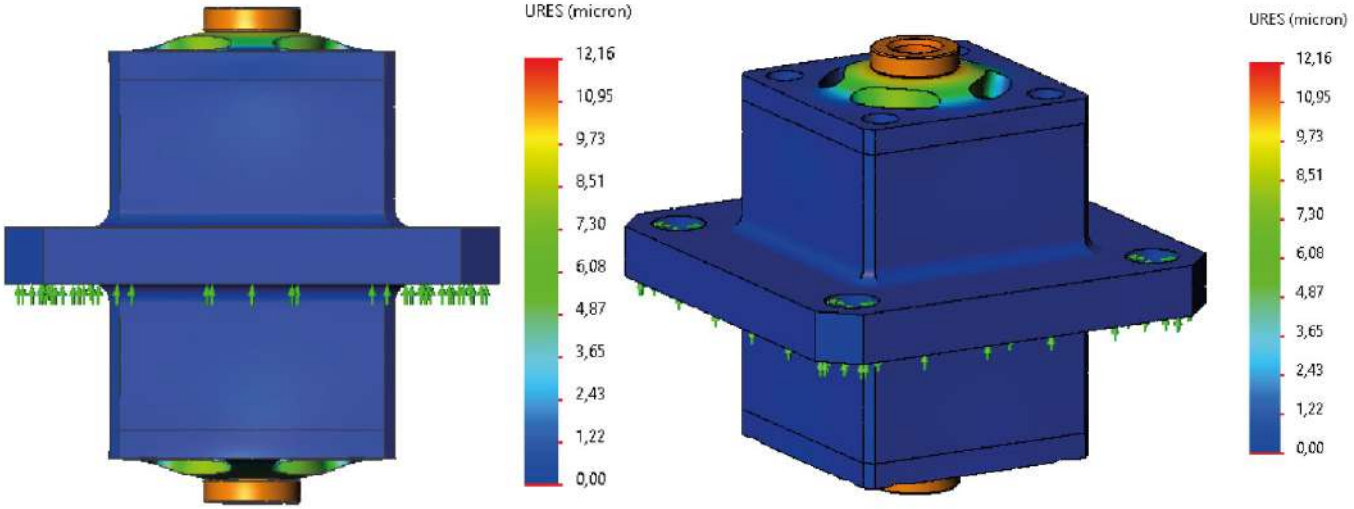



Рисунок 28. Результат моделирования деформации мембран сканера при воздействии силы со стороны пьезопакета 800 Н

В результате моделирования была подобрана оптимальная толщина мембраны сканера (1.5 мм). Внешний вид модели мембраны сканера показан на Рисунке 27. При заданной в модели силе 800 Н (блокирующая сила ПА), каждая из мембран перемещается на10 мкм, что допускает суммарное удлинение пьезопакетов 20 мкм. Это на 30% больше, чем максимальное удлинение используемых пьезопакетов. Следовательно, при работе сканера сопротивление мембран не достигнет блокирующей силы пьезопакетов и не ограничивает их перемещение.

## 3.3. Экспериментальные исследования разбалансированного и сбалансированного сканеров, сравнение экспериментальных результатов с модельными расчетами

На основании выполненного моделирования был разработан и изготовлен прототип сбалансированного сканера, показанный на Рисунке 29.

Схема измерения АЧХ сканера показана на Рисунке 30. Для измерения ускорений, действующих в месте закрепления пипетки, использовался миниатюрный пьезопакет, размерами 2x2x5 мм³. Один край пьезопакета зафиксирован на подвижной части сканера, а второй оставался свободен. При воздействии внешнего механического перемещения на зафиксированную часть пьезопакета, весь пьезопакет подвергается деформациям благодаря своим упругим свойствам. За счёт прямого пьезоэффекта на электродах пьезопакета появляется разность потенциалов. Величина этой разности потенциалов прямо пропорциональна величине ускорения, действующего на пьезопакет. Этот сигнал подается на синхродетектор. Опорным сигналом для синхродетектора является сигнал раскачки, который подается на

пьезопакеты сканера. Выходной сигнал синхродетектора соответствует амплитуде ускорений, возникающих на подвижной части сканера на заданной частоте воздействия. Далее этот сигнал поступает на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), который осуществляет оцифровку данных для дальнейшей компьютерной обработки.

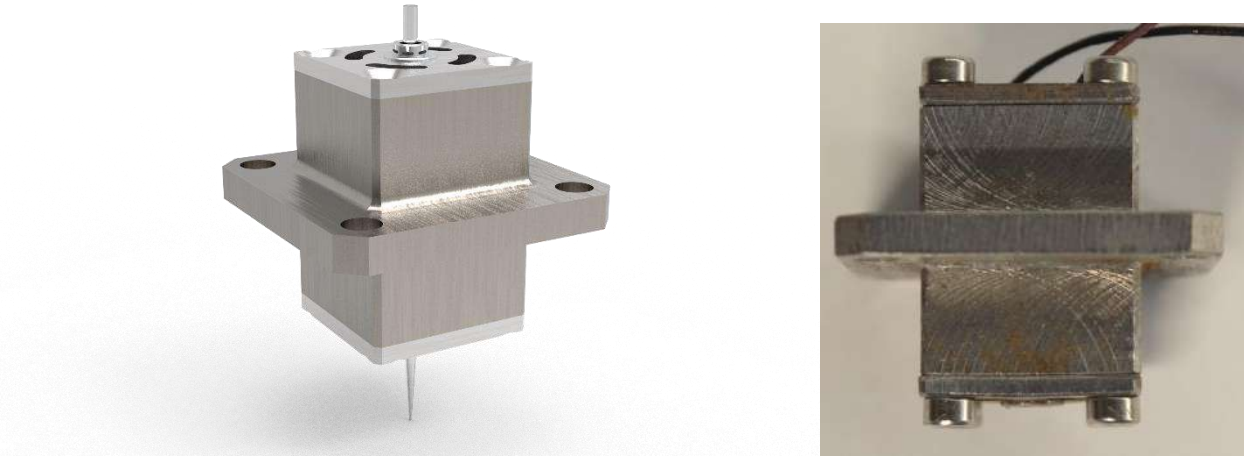


Рисунок 29. Рендер трехмерной модели сканера с установленной нанопипеткой для СМИП (слева), фотография прототипа сканера (справа)

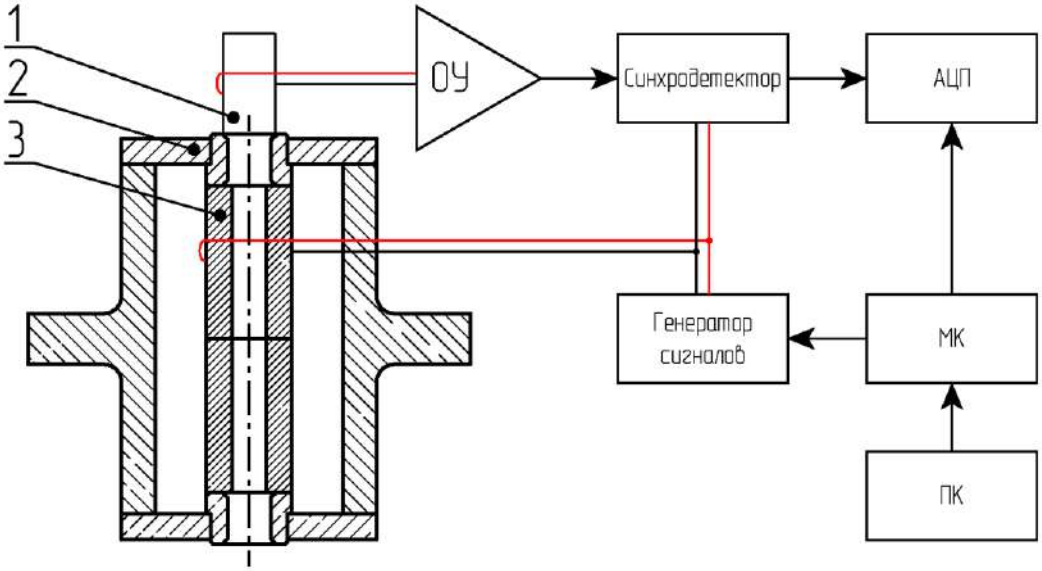



Рисунок 30. Схема для снятия АЧХ сканера. 1 – пьезоэлемент, 2 – мембрана сканера, 3 - пьезопакет

Управление всеми этапами процесса осуществляется специальным контроллером. Через интерфейс персонального компьютера (ПК) задаются необходимые параметры исследования: диапазон рабочих частот и количество отсчётов для анализа. Получив команду, микроконтроллер направляет управляющие сигналы на генератор раскачки, задавая нужную частоту возбуждения, одновременно регистрируя значения выходного сигнала синхродетектора, соответствующие каждой установленной частоте.

По окончании цикла замеров, охватывающего весь указанный диапазон частот, полученные данные сохраняются в виде массива чисел, представляющих зависимость амплитуды сигнала от частоты, и отправляются на компьютер для дальнейшего анализа и построения графика АЧХ.

Для сравнения прототипа сканера с его моделью в программе COMSOL были построены АЧХ сканера в сбалансированном и разбалансированном состоянии. Для создания дисбаланса в реальном эксперименте к сигналу раскачки подключался только один пьезопакет. На Рисунке 31 сверху представлены расчетные АЧХ для сбалансированного и разбалансированного вариантов сканера, а на Рисунке 31 снизу представлены соответствующие экспериментальные АЧХ. Расхождение составляет 150 Гц. Как в модели, так и в эксперименте наблюдается уменьшение резонансного пика при подключении двух пьезопакетов к сигналу раскачки.

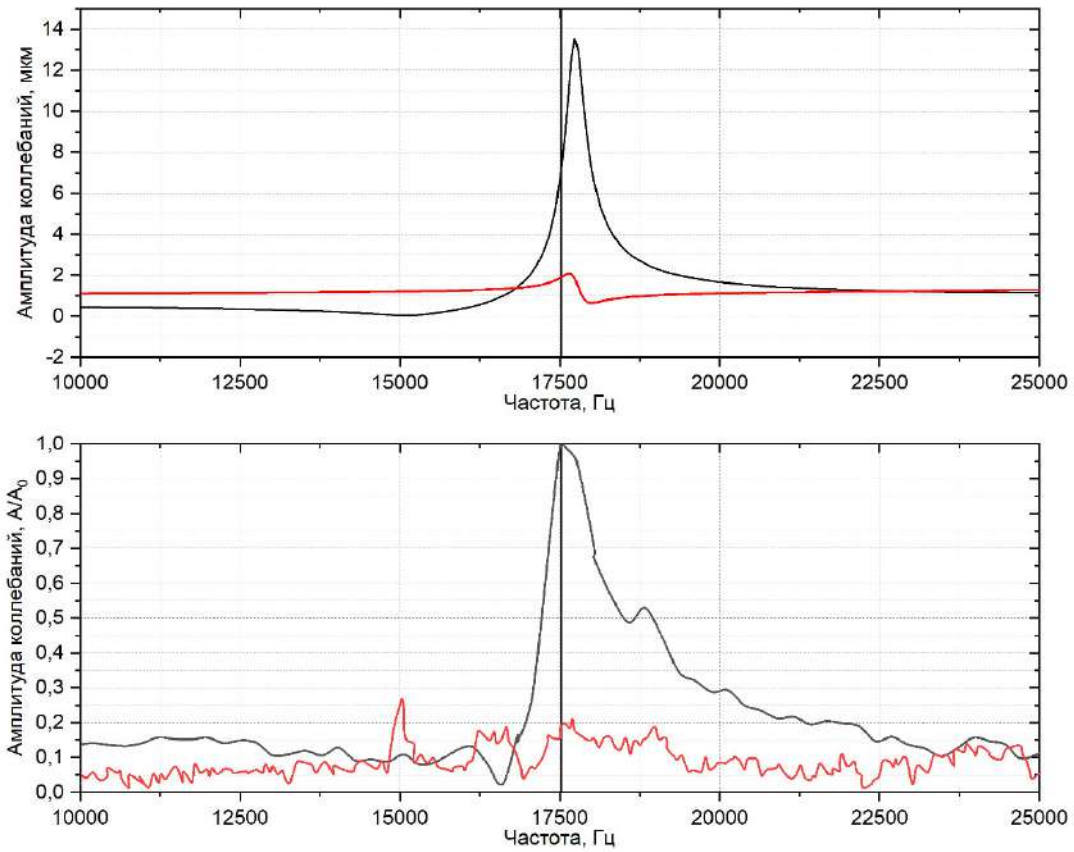



Рисунок 31. Сравнение расчетных (сверху) и экспериментальных (снизу) АЧХ сканеров в сбалансированном и разбалансированном вариантах

Сбалансированный сканер был испытан в качестве Z сканера при работе СИПМ в “hopping” моде (Рисунок 32 слева). В качестве зонда использовалась стеклянная пипетка с диаметром выходного отверстия около 100 нм. Тестовым образцом был полимерный слепок с кремниевой тестовой решетки TGX1. Этот же сканер был испытан в режиме ССМ с пьезорезонансным зондовым датчиком с зондом из вольфрамовой иглы с радиусом заострения около 50 нм. В качестве тестового объекта использовался DVD диск. На Рисунке 32 справа изображена топография поверхности образца, высота образца показана цветом. В случае использования при сканировании в “hopping” моде сбалансированной конструкции сканера с демпфированием

низкочастотного резонанса получено 4-х кратное увеличение скорости сканирования по сравнению разбалансированной конструкцией.

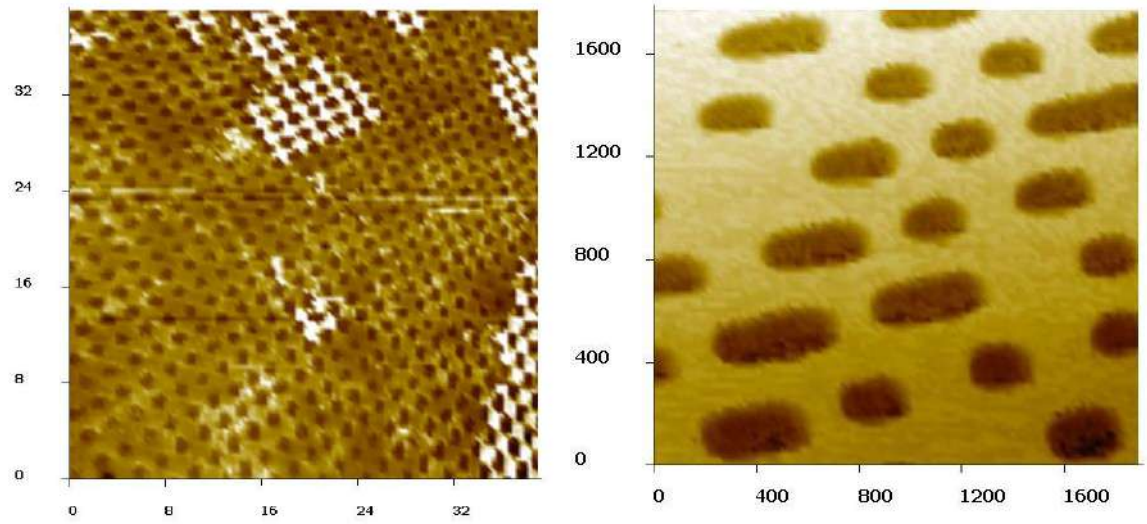



Рисунок 32. Результаты сканирования полимерного слепка решетки TGX1 в СИПМ (слева) и DVD диска в ССМ (справа)

## 3.4. Выводы

Таким образом, выполненные исследования с использованием как численных расчетов на моделях, так и экспериментальных измерений, показали, что баланс центра масс в СЗМ сканерах на основе пьезопакетов обеспечивает уменьшение в 8 раза амплитуды колебаний на частоте первого резонанса по сравнению с разбалансированной конструкцией. Как показали модельные расчеты, при балансировании центра масс реального пьезосканера необходимо принимать во внимание не только смещение центра масс пьезопакетов, но и смещение центра масс корпуса, вызванное его деформацией, возникающей при растяжении/сжатии пьезопакетов. Минимизировать суммарное смещение центра масс пьезосканера удается путем выбора положения плоскости крепления корпуса сканера к корпусу прибора. Демпфирование колебаний сканера на первой резонансной частоте позволяют увеличить скорость сканирования. Результаты моделирования в среде COMSOL подтвердили возможность подавления первого резонанса в сканере и позволили оптимизировать геометрические параметры устройства. Сравнение АЧХ, полученных в модели и в эксперименте, показало адекватность модели. Эти результаты открывают новые перспективы для применения быстрых сбалансированных сканеров в сканирующей зондовой микроскопии.

**Положение, выносимое на защиту:**

Балансировка конструкции пьезосканера с двумя разнонаправленными упругими мембранами с учетом как активного смещения материала пьезоактюатора под действием обратного пьезоэффекта, так и пассивного смещения материала несущего корпуса, возникающего в результате упругих деформаций, позволяет в 7 раз уменьшить амплитуду резонансного пика по сравнению с разбалансированной конструкцией.

# Глава 4. Пьезорезонансный датчик силового взаимодействия совместимый с методом СИПМ

Как уже упоминалось в Главе 1, известны два типа зондов используемых в СИПМ: стеклянная или кварцевая пипетка с выходным отверстием диаметром около 100 нм и “FluidAFM” зонд, представляющий собой Si кантилевер с полой кремниевой пирамидкой и микрофлюидным каналом для подачи электролита [36, 37]. FluidAFM зондовый датчик может поддерживать как силовой, так и ионно-проводящий режимы сканирования, а также может использоваться для адресной доставки вещества в заданную точку на поверхности образца с нанометровой точностью, например, для введения в клетку сквозь клеточную мембрану. Такой зондовый датчик, фактически представляющий собой микрофлюидную микромеханическую систему, изготавливается по достаточно сложной дорогостоящей технологии, а также требует специальных навыков при работе с ним. Стеклянная нанопипетка является стандартным инструментом в микробиологии, цитологии, клеточной медицине и легко изготавливается методом термического вытягивания из стеклянных или кварцевых капилляров. Однако, она, вследствие большого веса, в принципе не совместима с Si кантилевером, используемым в силовой микроскопии. Вместе с тем, в [24,40] исследован пьезорезонансный датчик для ССМ на основе пьезокерамической трубки с зондом из стеклянной пипетки. Фактически, данный датчик выступает в роли бюджетного аналога «микрофлюидного кантилевера» (FluidFM) и может использоваться как в ионно-проводящем режиме в “hopping” моде и АС моде (с модуляцией величины зазора между зондом и образцом), так и в силовом режиме в резонансной полуконтактной моде. Такой зондовый датчик не должен вызвать затруднений при использовании СИПМ цитологами, микробиологами и медиками, поскольку зонд в виде заостренного стеклянного капилляра является их стандартным инструментом. Отметим, что при использовании резонансных измерительных мод быстродействие системы будет определяться не только подавлением паразитных резонансов сканера, но и динамическими характеристиками зондового датчика. Известно, что для стабилизации частоты колебаний механических резонаторов используются конструкции в виде камертонов. В данной, в отличие от [24,40], где исследовался однотрубчатый датчик, методом численного и реального эксперимента проведены исследования резонансного пьезокерамического силового датчика камертонного типа в зависимости от длины трубок и способа закрепления неподвижного конца камертона. Целью исследования на данном этапе было повышение резонансной частоты датчика, измерение его добротности на максимальной резонансной частоте и проверка работоспособности на тестовом образце с использованием в качестве зонда заостренной вольфрамовой проволоки. Поскольку вес вольфрамового зонда соизмерим с весом стеклянного капилляра, то на следующих этапах вольфрамовый зонд можно будет заменить на стеклянный нанокапилляр.

## 4.1. Принцип работы и конструкция пьезорезонансного зондового датчика камертонного типа

В работе [32] описан пьезорезонансный зондовый датчик, изготовленный из пьезотрубки длиной l=6.5 мм, внешним диаметром d= 1.2 мм и толщиной стенки h=0.25 мм. На внутреннюю поверхность был нанесен сплошной проводящий электрод, на внешней поверхности трубки располагались два электрода. Один конец трубки прикреплялся к текстолитовой плате с помощью припоя, как на Рисунке 33а. Внутренний электрод заземлялся. На один из внешних электродов подавалось напряжение от генератора, а с другого электрода подавался сигнал на усилитель. В результате одна половина пьезотрубки работала как вибратор, а вторая – как детектор колебаний. К свободному концу трубки прикреплялся зонд в виде заостренной W иглы длиной L=6 мм с радиусом при вершине R=50 нм. Резонансная частота f такого зондового датчика и добротность Q лежала в диапазоне 8-10 кГц и 15-20, соответственно. Разброс этих значений определялся точностью изготовления и качеством закрепления трубки к плате и W зонда к трубке. Добротность такого датчика также зависела от силы и места прижатия платы к массивному держателю датчика. С целью стабилизации работы датчика мы остановились на двух-трубчатой конструкции в виде камертона.

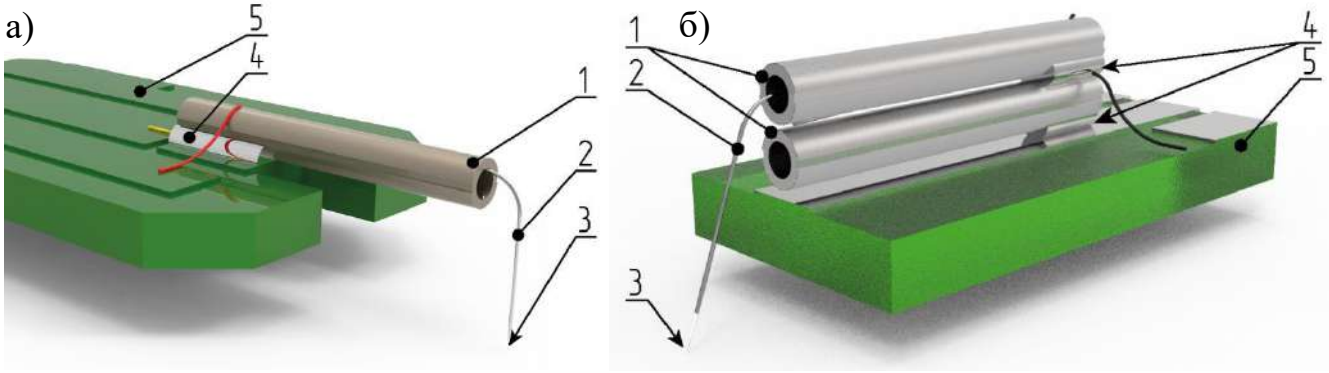



Рисунок 33. а) – пьезокерамический датчик силы с одной трубкой; б) – камертонный пьезокерамический датчик силы: 1 – пьезотрубки, 2 – вольфрамовый зонд, 3 – остриё вольфрамового зонда, 4 – припой, 5 – текстолитовая плата

Были исследованы два способа закрепления камертона. Первый способ закрепления повторял способ закрепления однотрубчатого датчика, когда одна из трубок припаивалась к текстолитовой плате (Рисунок 33б). Такое крепление не симметрично относительно двух плеч камертона, вследствие чего нижняя трубка подвергается дополнительным деформациям, ухудшая характеристики датчика. Недостатком такой конструкции является также датчик то, что датчик крепится на текстолитовой мембране, имеющей собственные резонансные частоты. Для симметричного закрепления камертона мы отказались от текстолитовой пластинки и прикрепляли пьезотрубки напрямую к разъему с помощью пайки (Рисунок 34).

Пьезорезонансный датчик (Рисунок 34) состоит из двух пьезокерамических трубок (1), соединённых между собой методом пайки (2) таким образом, чтобы

образовать структуру, подобную камертону. Такой пьезокамертон зафиксирован на разъеме (3) для подключения к измерительной схеме. Внутри одной из пьезокерамических трубок размещён вольфрамовый зонд (4) с острием изготовленным методом электрохимического травления в 5% растворе щелочи KOH или NaOH (5).

Каждая из пьезокерамических трубок имеет три электрода: два расположены вдоль боковой поверхности цилиндра, а третий — внутри отверстия трубки. Это конструктивное решение обеспечивает возможность управления вибрациями и регистрации откликов на воздействие внешних факторов. Схема подключения датчика представлена на Рисунке 37. Резонансные датчики, в которых в одном устройстве объединены функции возбуждения колебаний и измерения их параметров известны как «self-sensing» датчики.

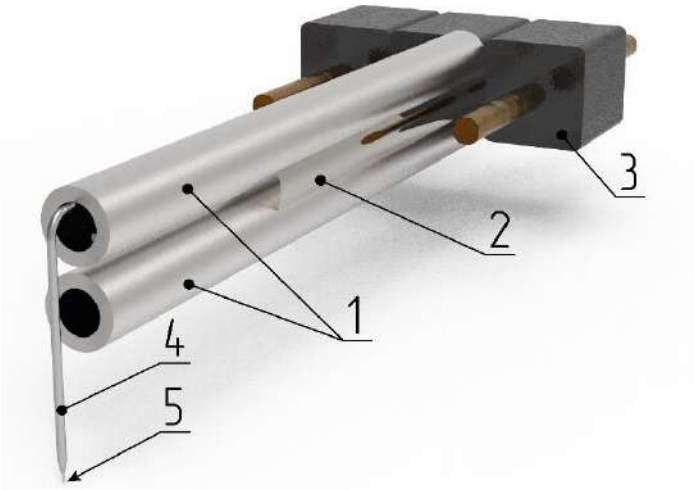



Рисунок 34. Пьезорезонансный камертонный датчик новой конструкции. 1 – пьезотрубки, 2 – припой ПОС-60, 3 – разъем держатель датчика, 4 – вольфрамовый зонд, 5 – остриё вольфрамового зонда

## 4.2 Модель пьезорезонансного зондового датчика силового взаимодействия на основе электромеханического камертона с двумя пьезотрубками

Моделирование силового датчика выполнялось при помощи пакета COMSOL Multiphysics. 3D геометрия модели импортирована из файла, сгенерированного в программе Solid Works, и далее была модифицирована и параметризирована инструментами COMSOL. Модель состоит из 2х пьезокерамических трубок, соединенных спайкой из олова, вольфрамового зонда и дополнительных элементов крепежа. Пьезотрубки моделируются с использованием параметров материала PZT 5H из библиотеки COMSOL. Вычисления проводятся при помощи физических модулей «Электростатика» и «Механика твердых тел», соединенных мультифизической связкой «Пьезоэлектрический эффект». Пьезотрубки имеют радиальную поляризацию, для этого в модели для каждой трубки построены

локальные цилиндрические системы координат. Электроды датчика представлены граничным условием «Терминал». Боковые грани базы датчика жестко закреплены.

Модельное исследование датчика проводилось следующим образом: выполнялся поиск собственных резонансных частот и построение АЧХ для серии камертонных датчиков с постепенно уменьшающейся длиной свободной консоли. В модели воспроизведены все конфигурации участвовавших в эксперименте датчиков и выполнен расчет их собственных колебательных мод. Были отобраны колебательные моды плеч камертона вдоль координаты Z, повторяющие траекторию движения подобную движению ножниц, для которых были построены графики для 1-ой и 2-ой колебательных мод датчика

Для построения расчетной сетки была проведена оценка длины волны в каждом материале, присутствующем в модели, по формулам (1), (2), аналогично тому, как это сделано для моделей сканера и пьезопривода. Т.к. длина волны обратно пропорциональна рабочей частоте модели, для выполнения оценки использована максимальная частота 100 кГц.

В модели датчика использовались следующие материалы: пьезокерамика PZT 5H, конструкционная сталь и олово. Величины скорости звука для стали и пьезокерамики были вычислены ранее и составляют соответственно 5850 м/с и 4580 м/с (Таблица 1). Результат расчета скорости звука для оловянной спайки и вольфрамового зонда приведен в таблице.

Таблица 6. Величины параметров материалов, используемых в модели

| **Элемент модели** | **Материал** | **Плотность, кг/м3** | **Модуль Юнга, ГПа** | **Отношение Пуассона** | **Скорость звука, м/с** |
|---|---|---|---|---|---|
| Спайка трубок | Олово | 7300 | 49 | 0.36 | 3370 |
| Зонд | Вольфрам | 19260 | 374 | 0.29 | 5020 |

В данной модели необходимо учесть, что деформация пьезотрубок происходит как в направлении поляризации (радиальном), так и в ортогональном ему направлении (вдоль оси трубок). Известно, что скорость звука в направлении, ортогональном направлению поляризации уменьшается на 20-40 %. [80] Таким образом, она может составлять около 2750 м/с, что является меньшей из скоростей звука в материалах по всей модели. Длина волны λ для этой скорости на частоте 100 кГц, рассчитанная по формуле (1), составляет примерно 28 мм. Величина $\lambda/5$, равна 5.6 мм хотя и вдвое меньше длины трубок, но существенно больше размера элемента даже очень грубой сетки. Таким образом, первое условие для построения сетки удовлетворено.

Для объемной модели датчика построена сетка из тетраэдров. В области соединения трубок, где наблюдаются наибольшие напряжения материала, размер элементов сетки уменьшен. Для гладкого описания криволинейных элементов увеличен параметр квадратуры. Изображение базовой сетки приведено на Рисунке 35.

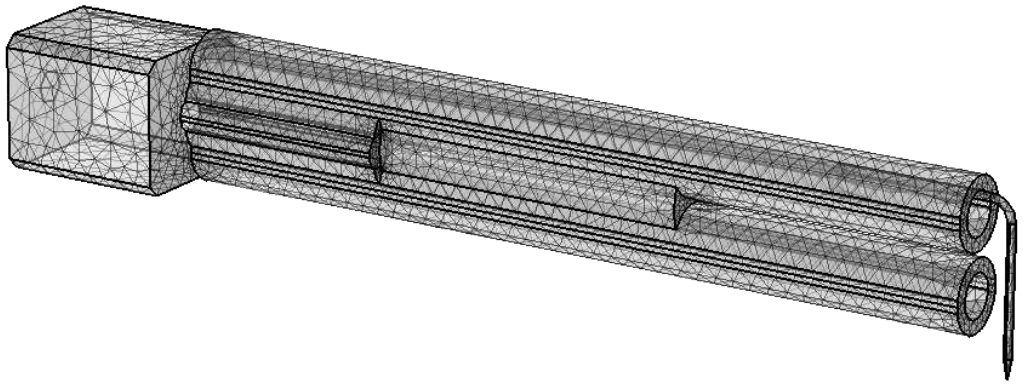


Рисунок 35. Базовая сетки модели датчика в программе COMSOL

Для уточнения параметров сетки был введен коэффициент сгущения сетки и проведены исследования в частотной области для частот в окрестности первого и второго резонансов датчика. Т.к. задачей моделирования являлось построение АЧХ, при исследовании на сеточную сходимость отслеживалась амплитуда измеряемого напряжения.

Таблица 7. Сравнение результатов моделирования

| Коэффициент сгущения сетки k | Количество элементов сетки | Мода 1 | | Мода 2 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | f1, Гц | Амплитуда измеренного напряжения, мВ | f2, Гц | Амплитуда измеренного напряжения, мВ |
| 1 | 16212 | 16840 | 68.6 | 84034 | 9.5 |
| 0.8 | 24573 | 16806 | 68.6 | 84122 | 9.8 |
| 0.6 | 49058 | 16785 | 68.9 | 83384 | 9.3 |
| 0.4 | 76105 | 16762 | 68.9 | 83760 | 9.4 |

Данные исследования на сеточную сходимость, приведенные в Таблице 7, демонстрируют, что исходная сетка достаточна для расчетов данной модели в частотной области и может быть использована для экономии вычислительных ресурсов.

Добротность системы на двух резонансных частотах определяется на основании экспериментально измеренных АЧХ.

Т.к. некоторые узлы моделей изготовлены из пьезоматериала, и в вычислениях учитывается пьезоэффект, в этих узлах помимо механического демпфирования учитываются потери в связующем модуле (Coupling loss) и диэлектрические потери. В модели датчика параметры демпфирования по Рэлею установлены в соответствии с экспериментальными данными измерений АЧХ на двух резонансных частотах и одинаковы во всех узлах модели.

На Рисунке 36 показаны моды колебаний, полученные в результате моделирования.

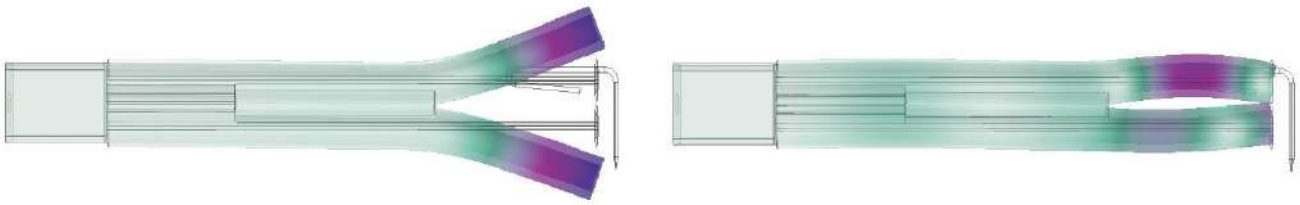


Рисунок 36. Моды колебаний датчика: а) – частота колебаний 16.8 кГц; б) частота колебаний 84 кГц

## 4.3. Экспериментальные исследования пьезорезонансного зондового датчика, сравнение экспериментальных и расчетных данных

На Рисунке 37 представлена схема, обеспечивающая работу пьезорезонансного зондового датчика. На датчик и вход синхродетектора подается сигнал раскачки с генератора сигналов. Генератор сигналов позволяет менять частоту и амплитуду раскачки. Выходной сигнал синхродетектора чувствителен к смещению фазы сигнала с датчика относительно опорного сигнала раскачки и соответствует проекции амплитуды колебаний пьезокамертона на реальную ось комплексной плоскости.

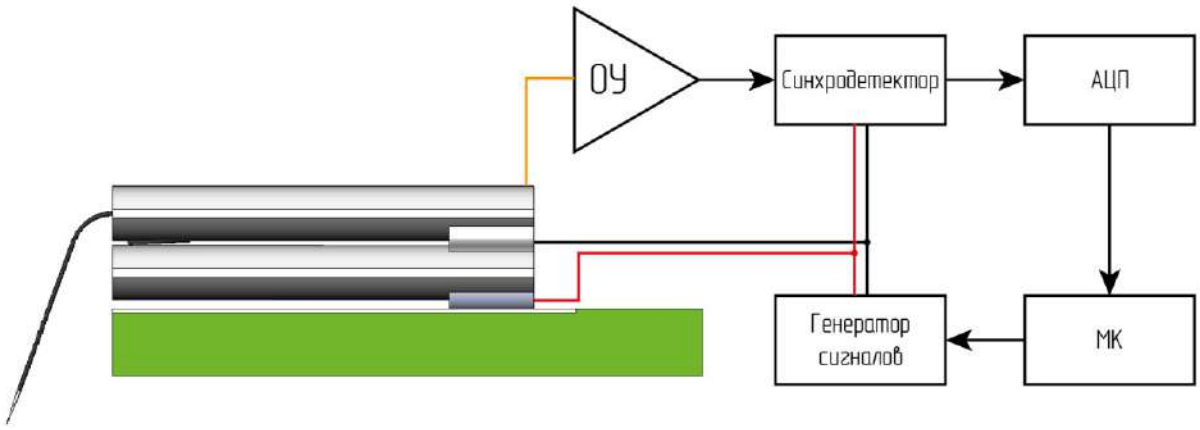



Рисунок 37. Схема измерения амплитуды колебаний пьезокамертона

При измерении АЧХ с генератора сигналов на датчик подается развертка частоты. Для каждого значения частоты происходит измерение сигнала с синхродетектора. А результате получается АЧХ, показанная на Рисунке 38.

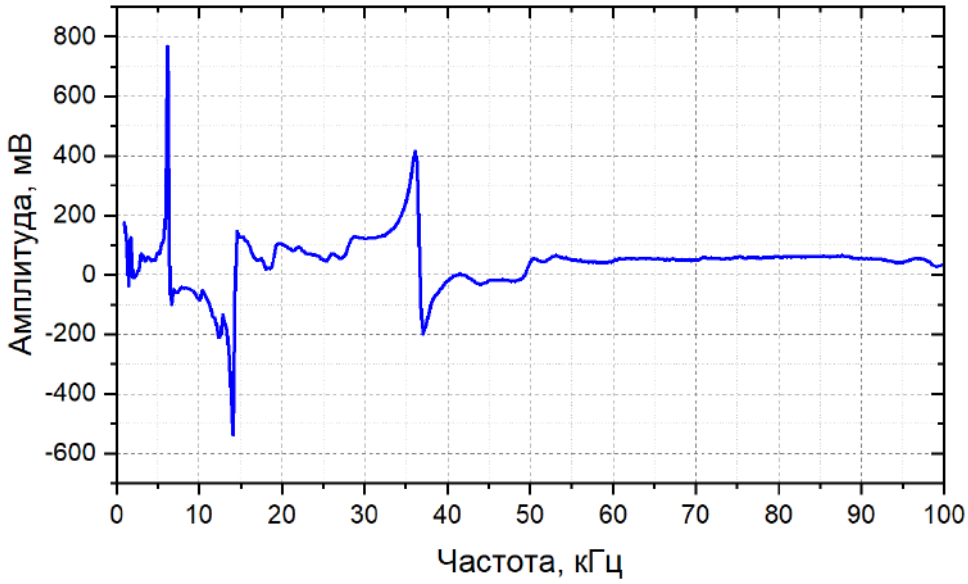



Рисунок 38. Измеренная АЧХ камертонного датчика при блине консоли 8.6 мм

## Сравнение АЧХ датчика при разной амплитуде раскачки и разном способе подключения датчика к генератору сигнала

Вследствие симметрии закрепления камертона к опорной плате, любое из плеч камертона может работать как вибратор, на который подается напряжение раскачки от генератора, или как детектор колебаний, напряжение с которого подается на вход усилителя и затем на синхродетектор. Было исследование влияние на АЧХ способа подключения датчика. Как видно из Рисунке 39, способ подключения плеч камертона (к генератору или к усилителю) не оказывает существенного влияния на АЧХ датчика камертонного типа.

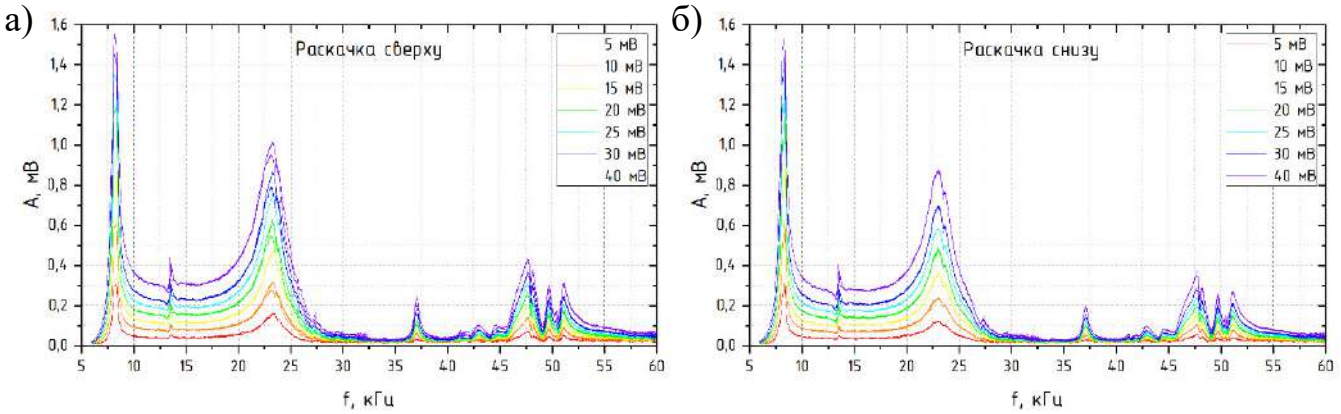



Рисунок 39. АЧХ датчика при разных способах подключения раскачки с генератора сигналов. а) – раскачка подключается на верхнюю трубку; б) – раскачка подключается на нижнюю трубку

## Сравнение АЧХ при разных способах установки зонда

Было исследовано, как установка зонда влияет на АЧХ. Для этого производилось измерение АЧХ с вольфрамовой иглой, установленной в верхнюю и нижнюю трубки. По полученной АЧХ (Рисунок 40) видно, что на моде колебаний около 8 кГц при установки зонда в нижнюю трубку амплитуда резонанса

уменьшилась, в то время как на другой моде, около 50 кГц, амплитуда наоборот увеличилась. Мы проверили, что резонансы на частоте 20…25 кГц вызваны колебаниями зонда, а не пьезотрубок, поэтому их можно не учитывать и они не рассматриваются в данной работе. Частота второй колебательной моды при установке зонда в верхнюю трубку ниже, чем при установке зонда в нижнюю трубку, при этом добротность в первом варианте выше, чем во втором.

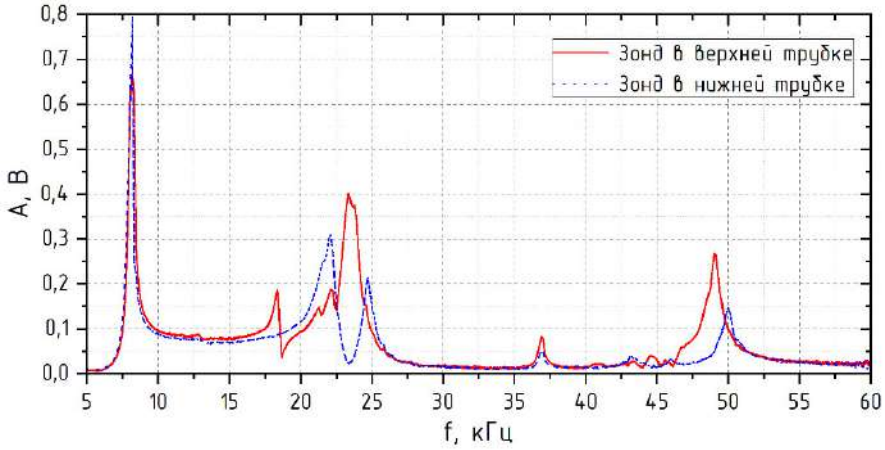



Рисунок 40. АЧХ датчика при разном закреплении зонда

## Сравнение АЧХ при разной длине свободной части пьезотрубок

Исследование колебаний при разной длине свободной части пьезотрубок производилось на датчике с симметричным креплением камертона. Пьезокерамические трубочки длиной 15 мм припаивались к разъему, как показано на Рисунке 41а. Максимальная длина пьезотрубок составляла 10.5 мм. Длину свободной часть пьезотрубок уменьшали постепенно, запаивая пространство между трубками (Рисунок 16б). Минимальная длина, которую удалось достичь, составила 1.8 мм. Для каждой длины производилось снятие АЧХ, а также измерялась изменение амплитуды колебаний при сближении зонда с образцом (кривая подвода, Рисунок 42).

Полученная зависимость частоты от длины свободной части пьезотрубок камертонного датчика показана на Рисунке 43. Крестом отмечены резонансы, на которых не удалось измерить кривую подвода. На частоте 6.3 кГц (при длине 8.6 мм) датчик входил в резонанс со сканером из-за чего измерения проводить было не возможно, а на частоте 75.5 кГц (при длине трубки 1.8 мм) из-за высокой жесткости датчика сильно деформировалась иголка и осуществить сближение зонда с образцом оказалось также невозможно. Также на графике отображены результаты моделирования датчика в программе COMSOL. Сравнение экспериментальных и рассчитанных в модели резонансных частот на Рисунке 43 показывает хорошее совпадение, что служит верификацией построенной модели (геометрия, выбранные материалы, расчетная сетка).

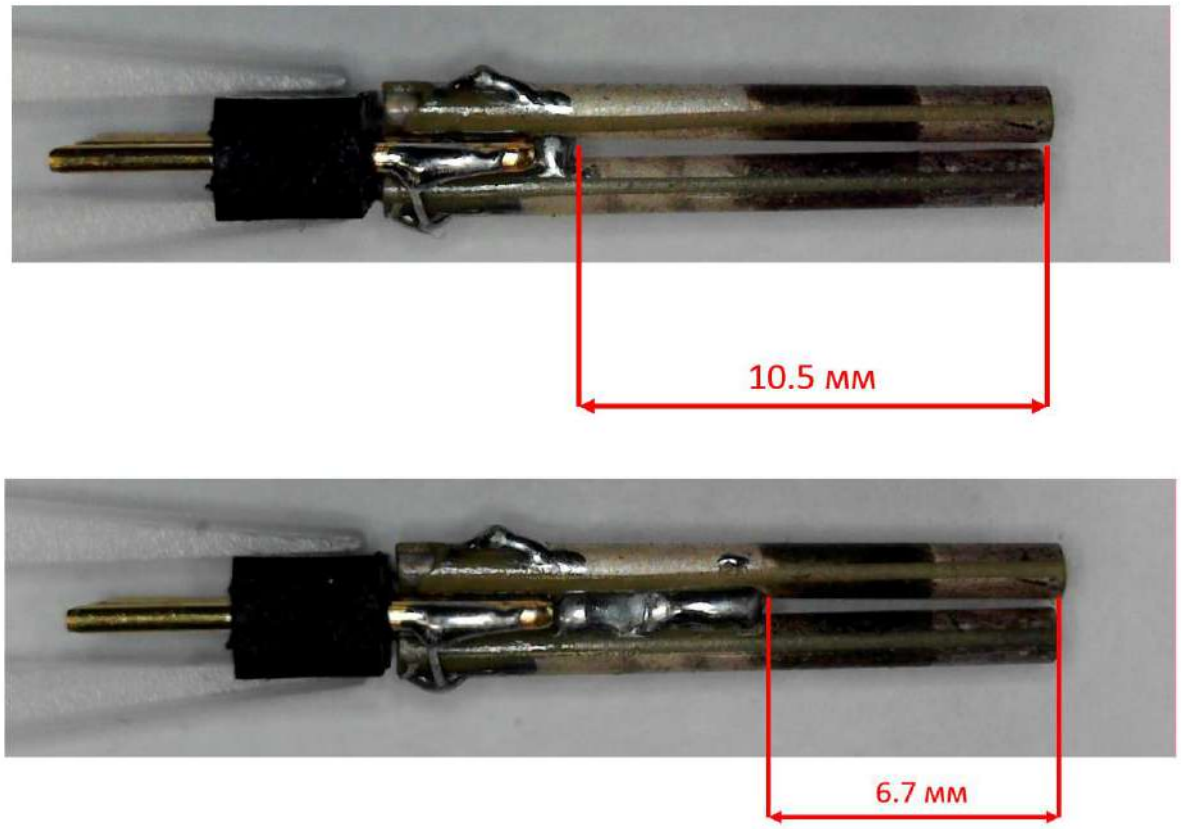



Рисунок 41. Датчик с разной длиной свободной часть пьезотрубок




Рисунок 42. Зависимость амплитуды колебаний датчика от удлинения сканера при сближении зонда с образцом на второй моде колебаний на частоте 83.6 кГц (длина свободной части трубки 5 мм)

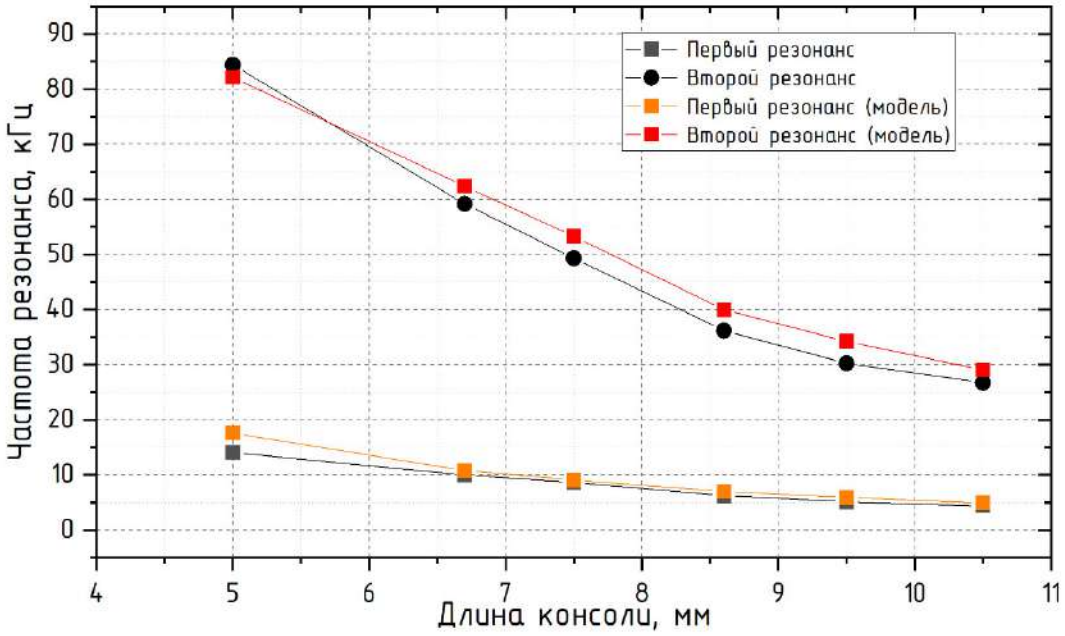



Рисунок 43. График зависимости частоты резонансов от длины свободной части пьезотрубок камертонного датчика.

Благодаря тому, что на высокой частоте раскачки у пьезорезонансного камертонного силового датчика сохраняется чувствительность к взаимодействию зонда с образцом, возможно увеличить скорость сканирования этим датчиком, так как за счет более высокой несущей частоты улучшается стабильность системы управления (несущая частота отдалена от механических резонансов сканера) и увеличивается полоса пропускания ОС, отчасти ограниченная частотой раскачки датчика.

Для датчика длиной 5 мм добротность на первой колебательной моде (14 кГц) составляет ≈63, а на второй (84 кГц) – ≈82. Добротность измерялась через ширину полосы пропускания контура $\Delta f$:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \tag{9}$$

где $Q$ – добротность резонанса, $f_0$ – частота резонанса, $\Delta f$ – ширина полосы пропускания (Рисунок 44).

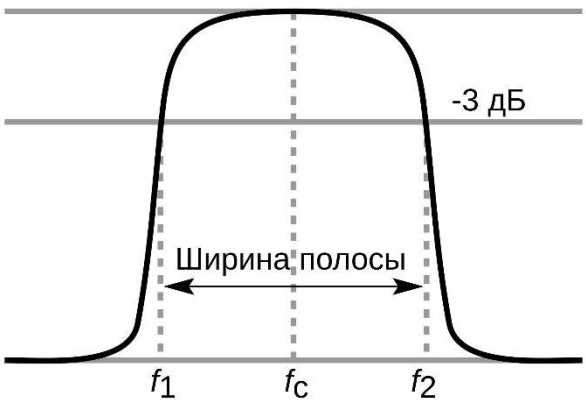



Рисунок 44. Определение ширины полосы пропускания резонанса

На второй колебательной моде добротность больше в 1.3 раза, а значит и число колебаний переходного процесса больше, но увеличение частоты колебаний еще больше (в 6 раз). Время переходного процесса можно оценить:

$$T_{\text{отклик}} = N * T = \frac{N}{f_0} \quad (10)$$

где $T_{\text{отклик}}$ – время отклика на воздействие, $N$ – число колебаний за время отклика, $T = 1/f_0$ – период резонансных колебаний.

$$N = \frac{Q}{\pi} \quad (11)$$

Отсюда следует, что:

$$T_{\text{отклик}} = \frac{Q}{\pi * f_0} \quad (12)$$

Для первой моды время отклика составит 1432 мкс, тогда как для второй моды – 314 мкс, что в 4.5 раза быстрее.

Для оценки увеличения скорости сканирования при использовании более высокочастотной моды колебаний датчика была разработана методика, в которой сравнивалась скорость сканирования на низкочастотной и высокочастотной модах. Сканирование производилось с использованием обратной связи в режиме постоянной амплитуды на кремниевой решетке TGX1 вольфрамовым травленным зондом.

Чтобы при увеличении скорости сканирования зонд успевал описывать профиль поверхности образца, требуется увеличивать коэффициент усиления ОС. Однако, сильно увеличивать коэффициент ОС невозможно, так как в системе начинают появляться автоколебания, которые портят результаты измерений и могут вовсе привести к повреждению зонда или образца.

Для оценки максимальной скорости сканирования коэффициент усиления выбирался максимально возможный до появления автоколебаний, после чего производилось сканирование кремниевой решетки с резким перепадом высоты. Скорость сканирования увеличивалась до тех пор, пока сечение резкого перепада профиля не размывалось. При частоте раскачки датчика в 10.5 кГц удалось достичь линейной скорости движения зонда в 25 мкм/с (Рисунок 45а), а при частоте раскачки 63 кГц максимальная скорость сканирования составила 100 мкм/с (Рисунок 45б), что в 4 раза больше, чем на низкой частоте. При частоте раскачки 63кГц зонд повторил профиль, описанный зондом с частотой раскачки 10.5 кГц (Рисунок 46).

Отметим, что на Рисунке 45 правая часть углубления решетки при любой частоте сканирования имеет заметное искривление. Это связано с недостаточным быстродействием высоковольтного усилителя, подающего напряжение для сокращения сканера Z, вследствие чего зонд не успевает отдалиться от образца (особенно на высокой скорости сканирования). Данный артефакт слабо связан с увеличением рабочей частоты датчика и его можно уменьшить, используя высоковольтный усилитель с лучшим быстродействием. На Рисунке 44 представлены поперечные сечения изображений, полученные на первой и второй резонансных частотах пьезорезонансного датчика, из которых следует, что качество слежения за рельефом поверхности на разных скоростях сканирования практически одинаковое.

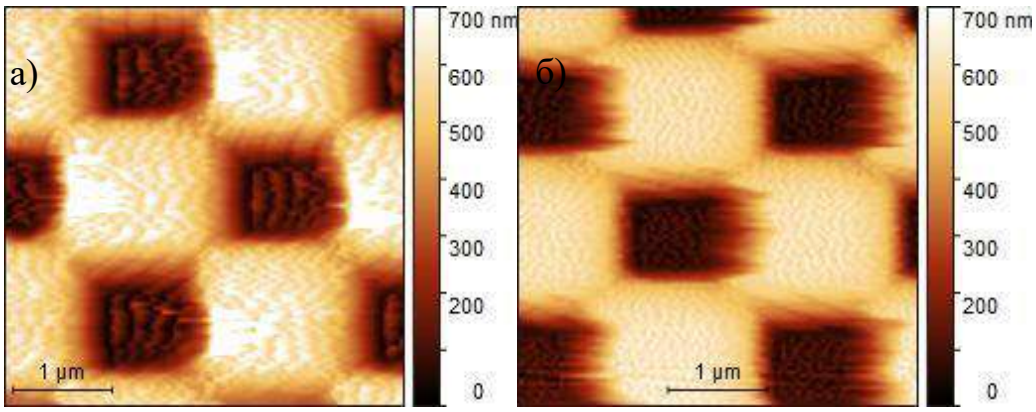



Рисунок 45. Результаты сканирования, полученные при разных колебательных модах датчика: а) – частота раскачки 10.5 кГц, скорость сканирования 25 мкм/с; б) – частота раскачки 63 кГц, скорость сканирования 100 мкм/с.

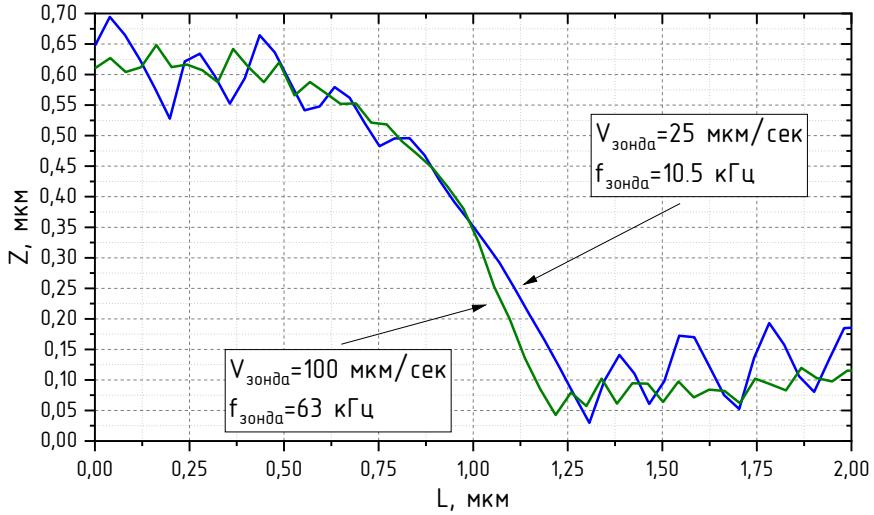



Рисунок 46. Сечение данных, показанных на Рисунке 45, по линии 1

## 4.4 Выводы

Предложенный пьезорезонансный зондовый датчик силового взаимодействия на основе камертона, составленного из двух пьезотрубок, демонстрирует стабильную работу на частотах первого (10,5 кГц) и второго резонансов (63 кГц). Разработанная цифровая модель дает согласующиеся с экспериментально измеренными расчетные АЧХ. Сканирование тестового объекта с применением вольфрамовой иглы в полуконтактной силовой на частоте второго резонанса датчика показало 4-х кратное увеличение скорости сканирования по сравнению со скоростью сканирования на частоте первого резонанса. Поскольку вес вольфрамовой иглы соизмерим с весом стеклянного нанокапилляра, возможно использование датчика для совмещения силового и ион-проводящего режимов, а также для доставки нанобъёмов жидкости в заданную точку на поверхности образца с нанометровой точностью. Предложенная конструкция датчика позволят в принципе совместить стеклянную нанопипетку, закрепленную на пьезотрубке датчика со стандартной стеклянной пипеткой, используемой в цитологии, микробиологии и клеточной медицине. Конструкция такой микрофлюидной системы представлена на Рисунке 47.

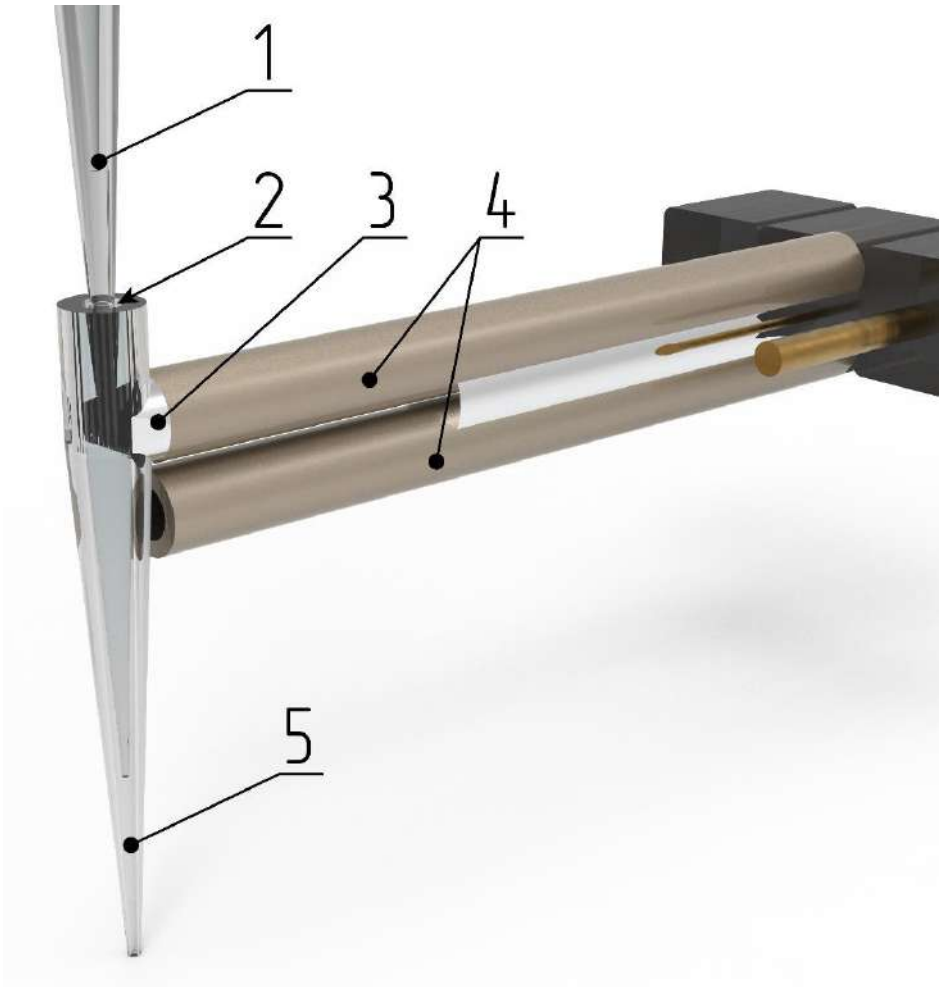



Рисунок 47. Пьезорезонансный камертонный датчик с двумя совмещенными нанопипетками. 1 – верхняя нанопипетка, 2 – физиологический раствор, 3 – клей, 4 – пьезотрубки, 5 – нижняя нанопипетка

# Глава 5. Аппаратно-программные решения, увеличивающие скорость сканирования в СИПМ

## 5.1. Алгоритм с оптимизацией высоты отвода зонда от поверхности образца в «hopping» моде СИПМ

В «hopping» моде СИПМ переход от точки к точке всегда происходит вдали от поверхности образца, а затем под контролем следящей системы (СС) осуществляется подвод НП к образцу и захват требуемого значения ионного тока. Такой способ сканирования улучшает устойчивость работы СКМ поскольку уменьшает прилипание мягких объектов к кончику НП и её неконтролируемые столкновения с поверхностью. Однако, при работе в «hopping» моде требуется дополнительное время на выполнение цикла «подвод – отвод», что заметно увеличивает время сканирования.

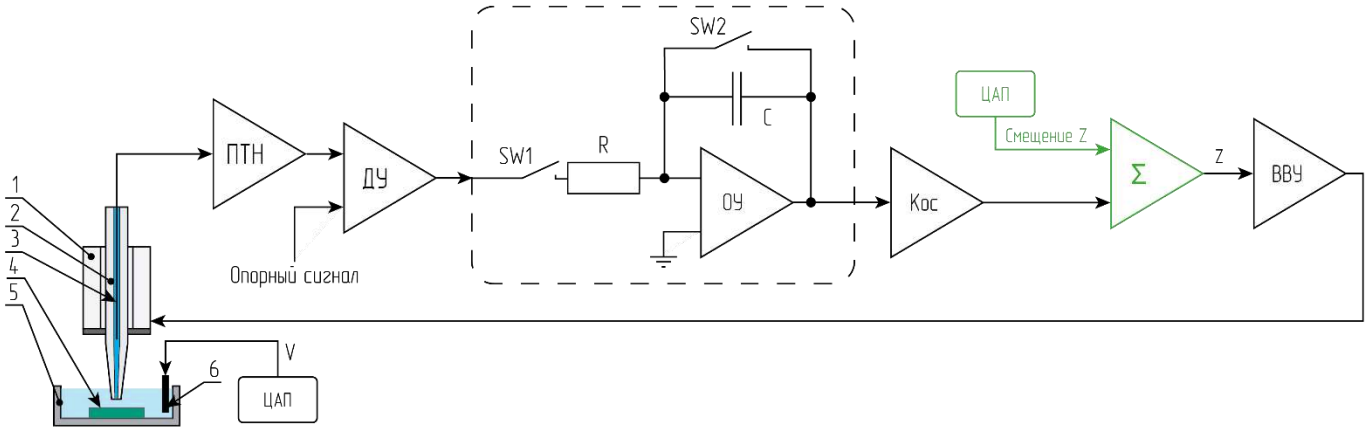



Рисунок 48. Схема СС с аналоговой петлей ОС, применяемая в СИПМ в режиме «hopping» моды. 1 - пьезосканер, 2 - НП, 4 - образец, 5 - чашка Петри с 5% раствором NaCl, 3,6 — AgCl электроды, V – источник напряжения на кольцевом электроде в чашке Петри, I/V - преобразователь «ток-напряжение», DAmp- дифференциальный усилитель, OAmp – операционный усилитель, K – усилитель петли ОС, DAC – цифро-аналоговый преобразователь, Σ – сумматор, HVA – высоковольтный усилитель. Сумматор Σ используется при реализации алгоритма, уменьшающего время измерений.

На Рисунке 48 представлена схема СС с аналоговой петлей обратной связи (ОС). В стандартном режиме «подвод – отвод» закрепленная на пьезосканере НП на этапе подвода перемещается к исследуемой поверхности (ключ SW2 разомкнут) за счёт плавного удлинения пьезосканера, управляемого линейно нарастающим напряжением от интегратора в петле ОС, до тех пор, пока сигнал ионного тока не стабилизируется на уровне опорного сигнала. Затем, после определения координаты Z путем измерения напряжения на входе высоковольтного усилителя, ключ SW2 замыкается, выходной сигнал интегратора обнуляется, пьезосканер возвращается в исходное «нулевое» положение (ноль на входе высоковольтного усилителя (ВВУ)), и

НП отводится на максимально возможное расстояние от поверхности. После чего НП переводится в новую точку с координатами X, Y, и процесс повторяется. (Рисунок 49а). Изображением поверхности образца является зависимость Z (X, Y).

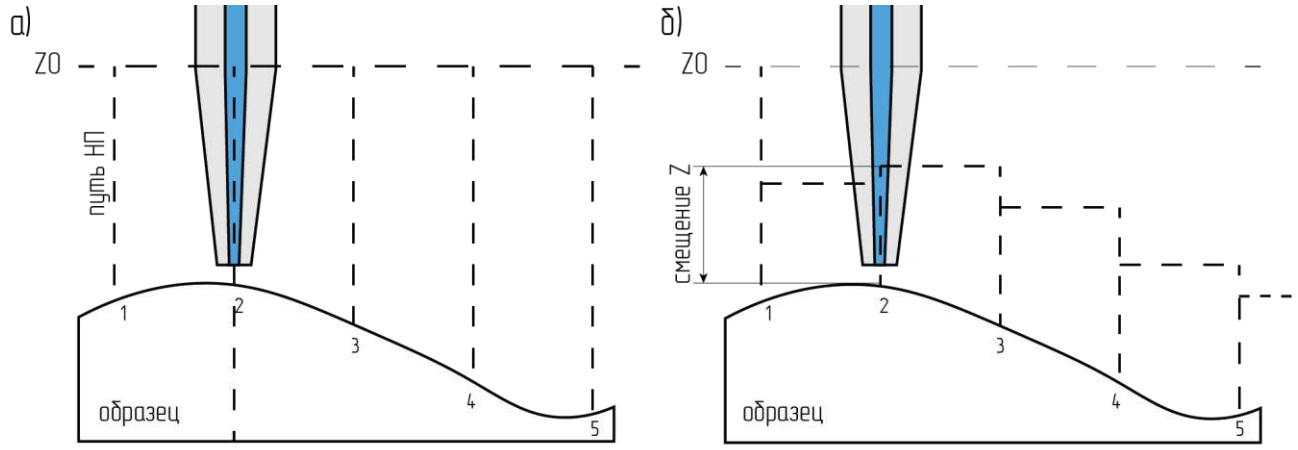



Рисунок 49. а – Траектория движения нанопипетки при сканировании образца без использования ЦАП; б – Траектория движения нанопипетки при сканировании образца с использованием ЦАП

Отметим, что при использовании данного стандартного алгоритма сканер возвращается в исходное «нулевое» положение, и НП отводится от поверхности на максимально возможное расстояние, что приводит к максимальному времени выполнения цикла «подвод – отвод». Для уменьшения времени, необходимого для выполнения этого цикла, было предложено в петле ОС после интегратора и усилителя установить сумматор, который добавляет к выходному сигналу усилителя напряжение, формируемое с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). В результате, даже при замкнутом ключе SW2 и нулевом напряжении на выходе интегратора, НП отводится от поверхности образца не на максимальное расстояние, а на некоторую меньшую высоту, определяемую напряжением формируемым ЦАП, и за меньшее время, что, в конечном итоге, значительно сокращает время сканирования (Рисунок 49б).

На Рисунке 51 представлен алгоритм сканирования одной линии в «hopping» моде с адаптивным уменьшением высоты отвода НП от поверхности образца в каждой точке строки сканирования. Начиная с первой строки сканирования, при перемещении зонда в первую начальную точку каждой строки подставка напряжения обнуляется, и сканер полностью втягивается, отводя НП на максимальное расстояние от поверхности. Затем, в результате интегрирования входного сигнала при замкнутой петле ОС, НП подводится из нулевого положения к поверхности образца, проходя максимальное расстояние до захвата и стабилизации рабочего значения тока. Поскольку в первой точке время интегрирования входного сигнала (время вытягивания сканера) максимально по сравнению с последующими точками на линии сканирования, то в этой точке устанавливается увеличенная задержка (t1) между началом интегрирования входного сигнала (размыканием ключа SW2) и моментом измерения координаты Z. После измерения Z в первой точке сканер полностью отводится (замыкается ключ SW2) от образца, и из значения Z вычитается высота

фиксированного отвода НП (stepZ), а полученная разница формируется с помощью ЦАП и плавно подается на сумматор. В результате, в следующих точках на строке сканирования в цикле «подвод-отвод» НП проходит не максимальное расстояние, обусловленное измеренной координатой Z и начальным нулевым положением сканера, а меньшее расстояние, затрачивая на это и меньшее время. Этот алгоритм учитывается при установлении времён задержки, и время t2 во всех последующих точках на строчной развертке устанавливается меньше времени t1, соответствующего точке максимального подъёма сканера. Величина stepZ подбирается после измерения рельефа на поверхности исследуемого образца по одной строке с использованием стандартного алгоритма, либо подбирается эмпирически из априорных данных об образце и устанавливается на 30-40% больше высоты предварительно измеренного или предполагаемого рельефа.

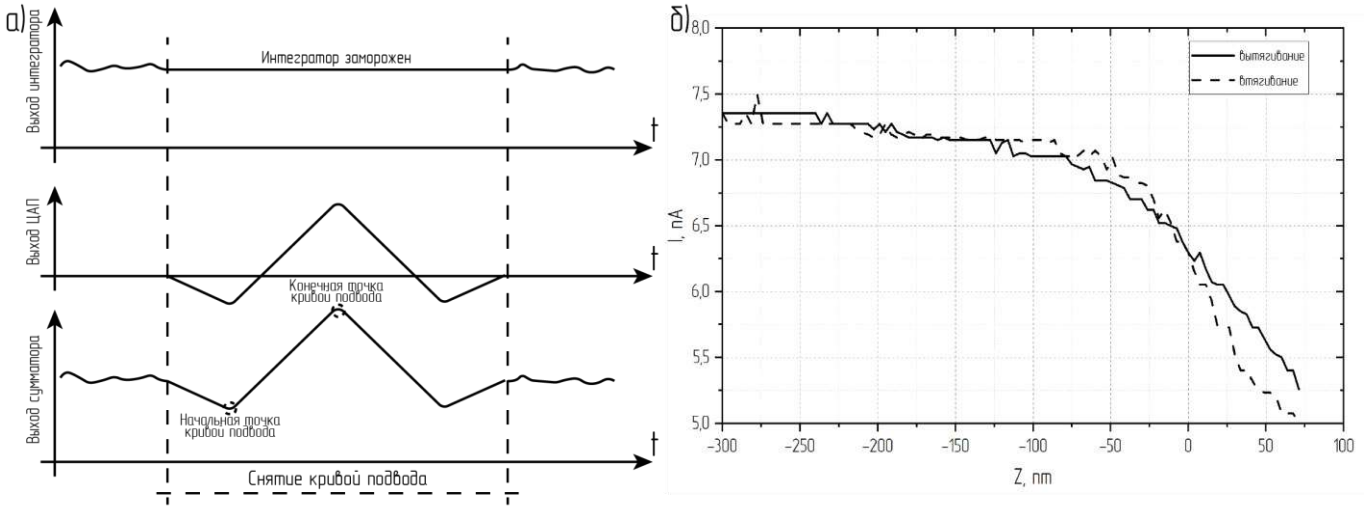



Рисунок 50. а – Осциллограммы сигналов интегратора, ЦАП и сумматора при измерении зависимости I(Z); б – Зависимость I(Z), измеренная предложенным способом

Схема управления, представленная на Рисунке 48, позволяет измерить так называемую кривую подвода, т.е. зависимость ионного тока от расстояния между НП и поверхностью (I(Z)). Для этого ключом SW1 разрывается петля ОС, напряжение на сканере запоминается (используется схема выборки — хранения, фиксирующая во времени выходной сигнал интегратора), и сигнал с ЦАП, добавляемый на входе ВВУ к исходному сигналу, приводит к удлинению или сокращению пьезосканера и, следовательно, к перемещению НП относительно исходного положения. Осциллограммы сигналов, полученные во время измерения I(Z), представлены на Рисунке 50а. Предложенная схема управления позволяет проводит измерения кривой подвода в каждой точке скана, что может быть полезно для изучения распределения зарядов на поверхности образца. Пример измеренной I(Z) показан на Рисунке 50б.

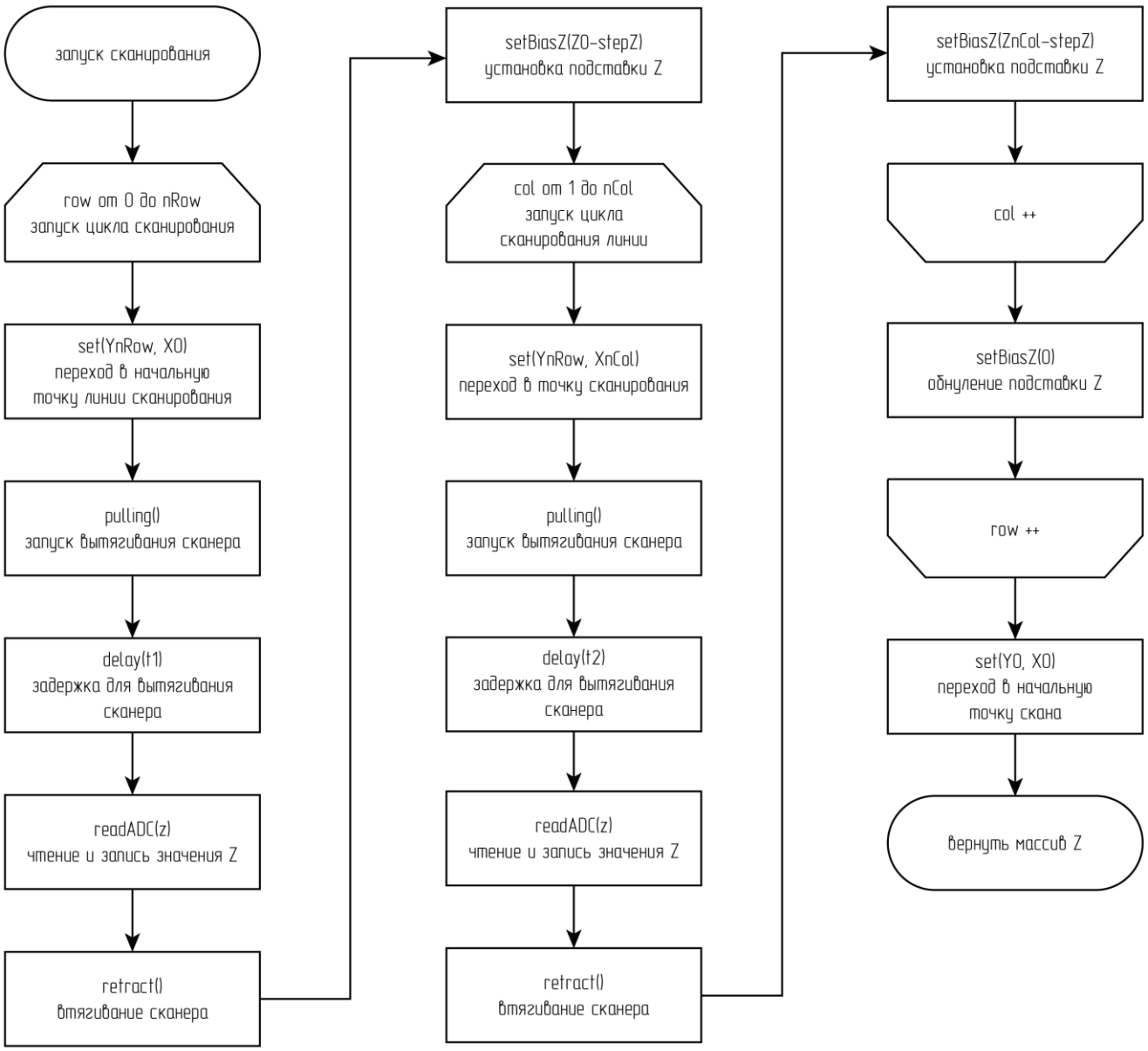



Рисунок 51. Блок-схема адаптивного алгоритма сканирования с уменьшением высоты отвода НП от поверхности образца в режиме «hopping» моды СИПМ

## 5.2. Алгоритм сканирования с аппаратным прерыванием

Несмотря на то, что алгоритм уменьшения времени получения изображения в «hopping» моде СИПМ смог значительно увеличить скорость сканирования без риска неконтролируемого столкновения НП с образцом, данная методика все еще остается медленной. Определяющим для скорости сканирования является время установления сигнала ионного тока на уровне опорного сигнала. Для увеличения скорости сканирования было предложено отказаться от стабилизации тока на уровне опорного значения, одномоментно втягивая сканер (удаляя НП от поверхности образца) и запоминая значение сигнала Z, при котором значение тока становится ниже заданного порога.

Схема предложенной следящей системы (СС) релейного типа с аппаратным прерыванием показана на Рисунке 52а. Пороговый детектор тока сравнивает сигналы

и выдает цифровой сигнал на МК при пересечении сигналом тока порога срабатывания заданного с ЦАП (Рисунок 52б). Обычно порог срабатывания устанавливается на несколько процентов ниже значения тока насыщения (тока, протекающего через НП, расположенную вдали от образца). Если в системе присутствуют шумы (как в опорном сигнале, так и в сигнале тока), то значение порога срабатывания должно быть снижено. Также выходной сигнал с детектора тока останавливает вытягивание сканера и обнуляет сигнал Z. При получении цифрового сигнала МК запускает в АЦП процесс оцифровки сигнала со схемы выборки с запоминанием. По завершению оцифровки сигнала МК выдает сигнал на перемещение сканера в следующую точку XY и сбрасывает схему выборки с запоминанием и выходной сигнал с порогового детектора тока, запуская новый цикл вытягивания сканера.

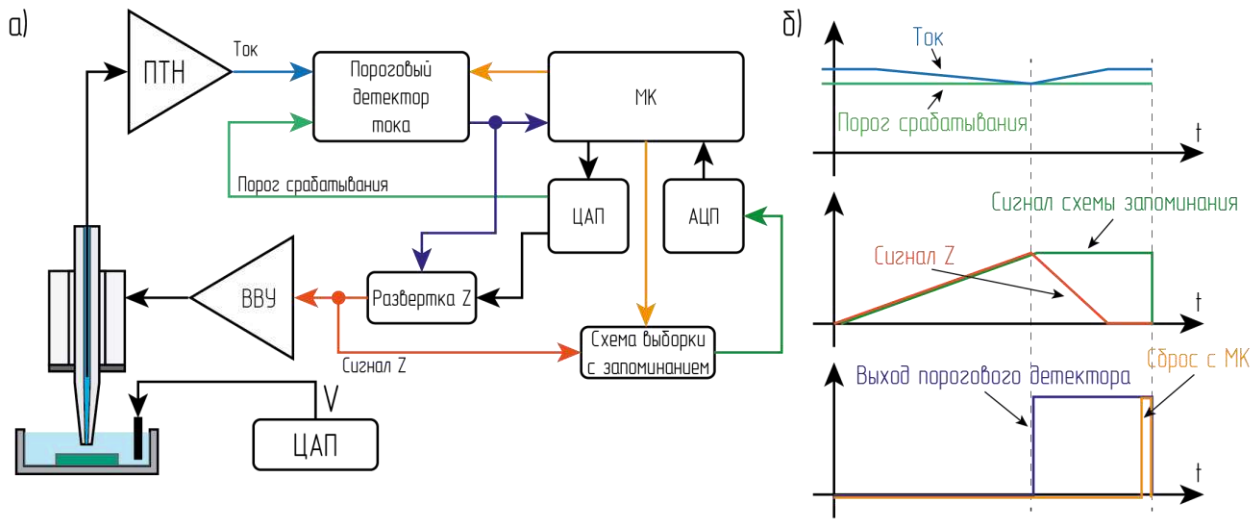



Рисунок 52. а – Схема СС с аппаратным прерыванием. ПТН – преобразователь ток-напряжение, МК – микроконтроллер, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ВВУ – высоковольтный усилитель; б – осциллограммы сигналов СС с аппаратным прерыванием во время измерения в одной точке

Предложенный алгоритм значительно ускоряет сканирование, так как ожидание в точке теперь определяется только скоростью вытягивания сканера и временем оцифровки сигналов в АЦП. В настоящее время АЦП с частотой оцифровки в сотни кГц легко доступны, поэтому быстродействие рассматриваемого алгоритма будет определяться быстродействием ПТН и порогового детектора тока. Стоит отметить, что в данном алгоритме фактически отсутствует процесс стабилизации ионного тока путем минимизации сигнала ошибки с помощью петли обратной связи и последующим измерением значения установившегося положения сканера по координате Z. Минимизация времени нахождения НП вблизи образца делает этот алгоритм более стабильным в сравнении с «hopping» модой СИПМ.

Предложенный алгоритм слежения за рельефом поверхности позволяет проводить измерение кривой подвода I(z) в процессе получения СИПМ изображения в любой заданной точке XnYm. При этом, угол наклона кривой подвода (Рисунок 54а)

несет информацию о жесткости поверхности образца [70-73], а пик на кривой подвода связан с локальным зарядом на поверхности [73-78].

Для определения угла наклона кривой подвода достаточно добавить в схему еще один пороговый детектор (Рисунок 53а), но настроенный на другой порог срабатывания, так, чтобы дополнительный детектор сработал раньше основного (Рисунок 54а и б). Выходной сигнал с дополнительного порогового детектора обнуляет входной сигнал схемы выборки с запоминанием, что позволяет «запомнить» для дальнейшей оцифровки уровень сигнала Z на котором был достигнут заданный порог тока. Угол наклона кривой подвода определяется по формуле:

$$\tan\alpha = \frac{I_0 * (k_2 - k_1)}{Z_1 - Z_2}, \text{нА}/\text{нм} \qquad (23)$$

где $I_0$ – ток вдали от образца, $k_1$ и $k_2$ – относительный порог срабатывания основного и дополнительного детекторов тока, $Z_1$ и $Z_2$ – значения Z в момент срабатывания основного и дополнительного детекторов соответственно.

Для регистрации выброса тока при сближении НП с образцом используется пиковый детектор тока (Рисунок 53б). Данный детектор «запоминает» для дальнейшей оцифровки максимальное значение сигнала тока за время сближения в точке. Если на поверхности имеется локальный заряд, то в сигнале тока при сближении НП с образцом наблюдается выброс, характеризующий увеличение тока (Рисунок 54а). Выброс тока будет кратковременным, поскольку далее будет происходить уменьшение тока, вызванное механическим перекрытием апертуры НП.

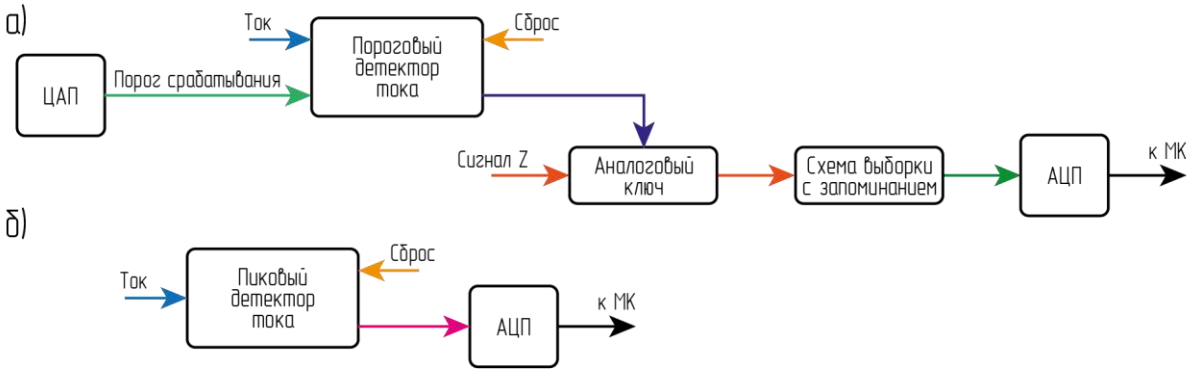



Рисунок 53. Схема подключения второго порогового детектора тока (а) и пикового детектора тока (б) к СС с аппаратным прерыванием

Предложенный алгоритм и схема измерений позволяют одновременно собирать информацию о рельефе образца и картировать распределение жесткости и зарядов на его поверхности. Важно, что время измерения в точке при этом не увеличивается, так как скорость подвода пипетки к образцу не изменяется, и все измерения проводятся параллельно. Для оцифровки сигналов используется синхронный АЦП, который производит оцифровку всех каналов одновременно – необходимость измерения еще двух каналов никак не замедляет работу алгоритма.

Блок схема алгоритма сканирования с аппаратным прерыванием показана на Рисунке 55. Как и в режиме «hopping» моды СИПМ, зонд в каждой точке, подводится к образцу с заранее заданного расстояния. Важным отличием является то, что не

затрачивается время delay(t1) для установления заданного значения тока, как в «hopping» моде (Рисунок 51), а сразу, как только срабатывает пороговый детектор тока, вызывается функция interrupt(), выводящая функцию pulling() из бесконечного цикла, запускается оцифровка данных с АЦП и переход в следующую точку сканирования. Втягивание сканера реализуется аппаратно путем блокировки развертки Z.

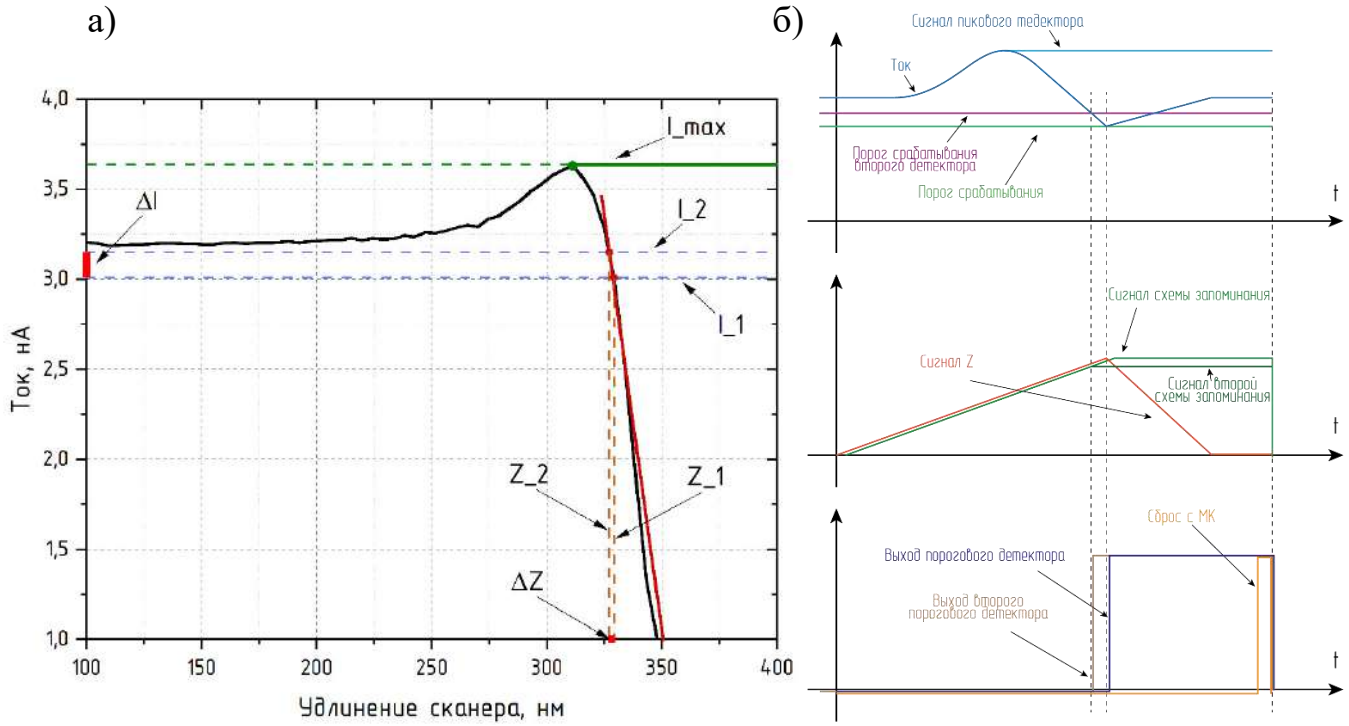



Рисунок 54. а – график зависимости тока от расстояния I(Z). с – максимальное значение тока за время сближения НП с образом, $I_1$ – пороговое значение тока первого компаратора, $I_2$ – пороговое значение тока второго компаратора, $Z_1$ – значение Z, при котором сработал первый компаратор, $Z_2$ – значение Z, при котором сработал второй компаратор, $\Delta I$ – разница пороговых значений тока, $\Delta Z$ – разница значений Z,; б – графики сигналов в СС с аппаратным прерыванием при использовании двух пороговых детекторов тока и пикового детектора тока

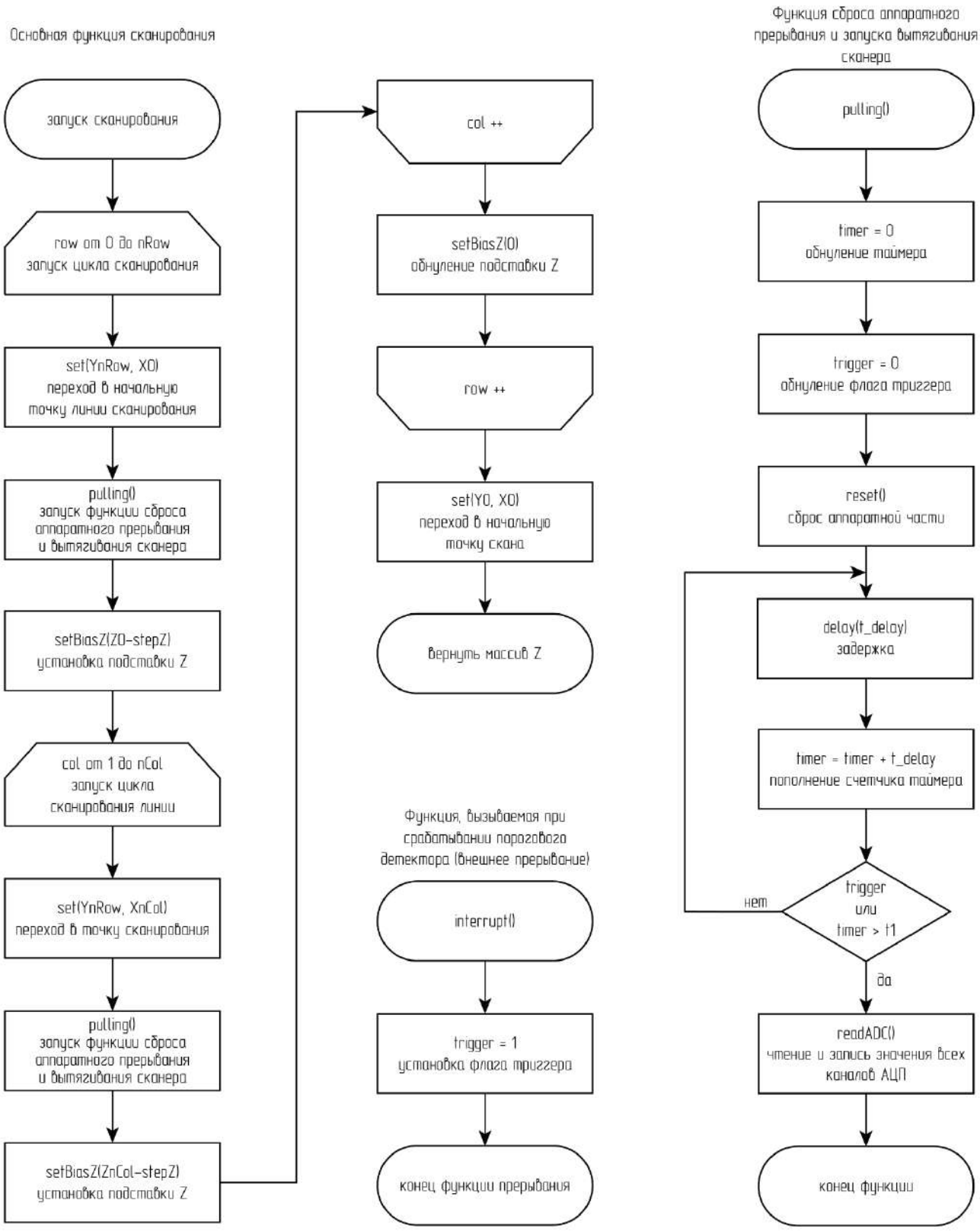



Рисунок 55. Блок-схема адаптивного алгоритма сканирования с аппаратным прерыванием

## 5.3. Аппаратная поддержка алгоритмов, обеспечивающих уменьшение времени измерений в СИПМ

### Преобразователь ток-напряжение

Для задания разности потенциалов между электродами в чашке Петри и нанопипетке (НП) используется шестнадцатибитный ЦАП с размахом сигнала ±10В. При стремлении увеличить ионный ток за счет увеличения разности потенциалов между электродами необходимо принимать во внимание возникновение электролиза воды при напряжении выше 1,23В. Поэтому в стандартных режимах СКМ напряжение смещения не превышает порога начала электролиза. Напряжение с ЦАП подается на электрод в чашке Петри относительно потенциала земли. Электрод в нанопипетке подключается на вход преобразователя ток-напряжение (ПТН), заземленный через малое входное сопротивление ПТН.

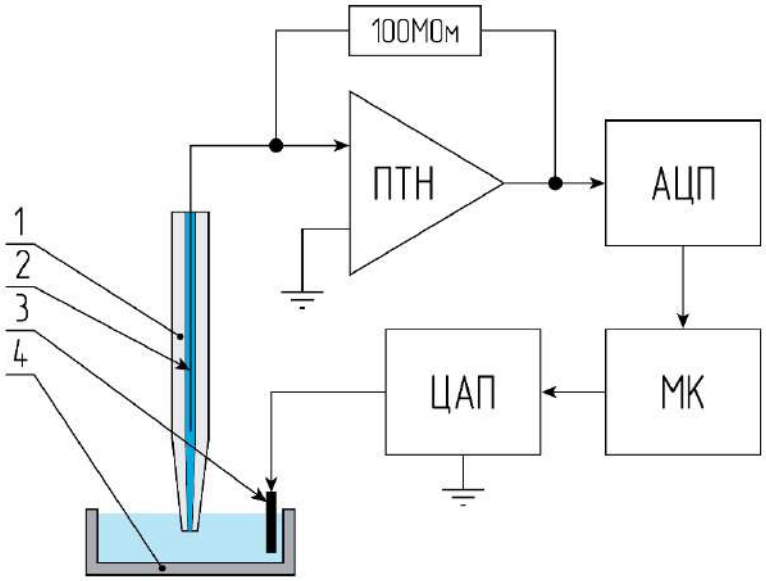



Рисунок 56. Схема подключения электродов и ПТН. 1 – НП, 2, 3 – AgCl электрод, 4 – чашка Петри с 5% раствором NaCl, ПТН – преобразователь ток-напряжение, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

Принципиальная схема ПНТ на базе низко шумящего прецизионного операционного усилителя AD795 показана на Рисунке 57. На вход «Электрод» подключается электрод в нанопипетке. Резистор R2 определяет коэффициент усиления ПТН. В данной схеме R2=90M, что соответствует коэффициенту усиления 0,9x10^8 или соотношению1В на 11 нА. Резистор R1 и диоды VT1 и VT2 защищают вход операционного усилителя от импульсов тока короткого замыкания и перенапряжения. Конденсатор C1 стабилизирует обратную связь ПТН и ограничивает его полосу пропускания.

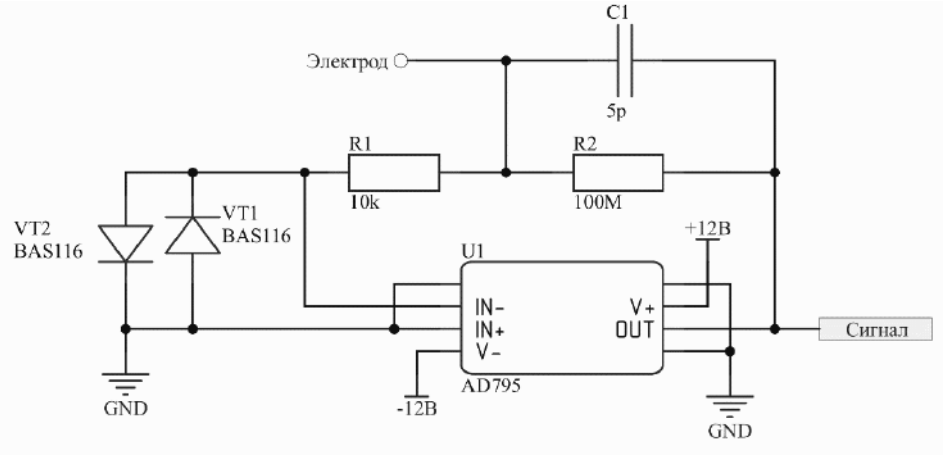



Рисунок 57. Принципиальная схема ПТН

Для оптимизации работы ПТН (по быстродействию и стабильности) была построена модель электрической части ПТН в программе MATLAB Simulink с использованием библиотеки физического моделирования Simscape (Рисунок 58).

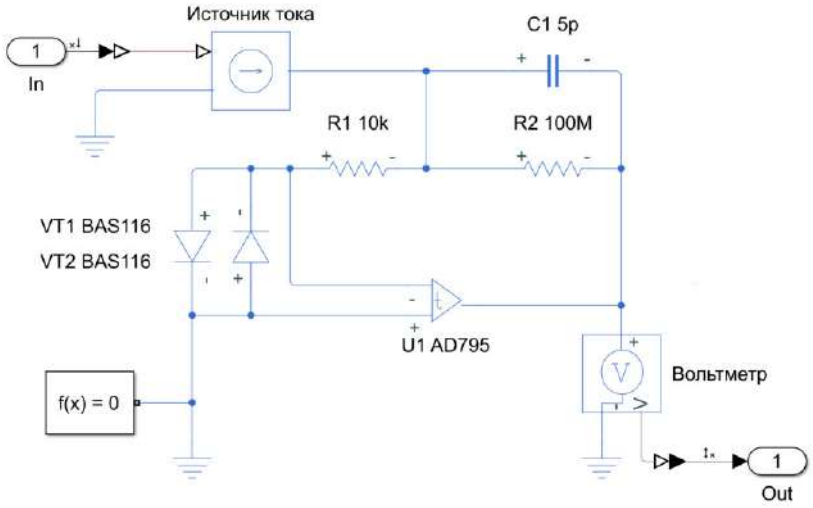



Рисунок 58. Модель ПТН в среде физического моделирования MATLAB Simulink Simscape

Для определения полосы пропускания ПТН через добавление Model Linearizer к Simulink была построена диаграмма Боде (Рисунок 59), по которой определена частота среза при уменьшении усиления на 3 дБ (0,707 от максимального). Частота среза составила 340 Гц. Частоту среза определяет конденсатор С1. При уменьшении номинала конденсатора частота среза будет увеличиваться, но при этом будет возрастать риск появления генерации в обратной связи ПТН. Значение конденсатора С1 в 5 пФ подобрано опытным путем.

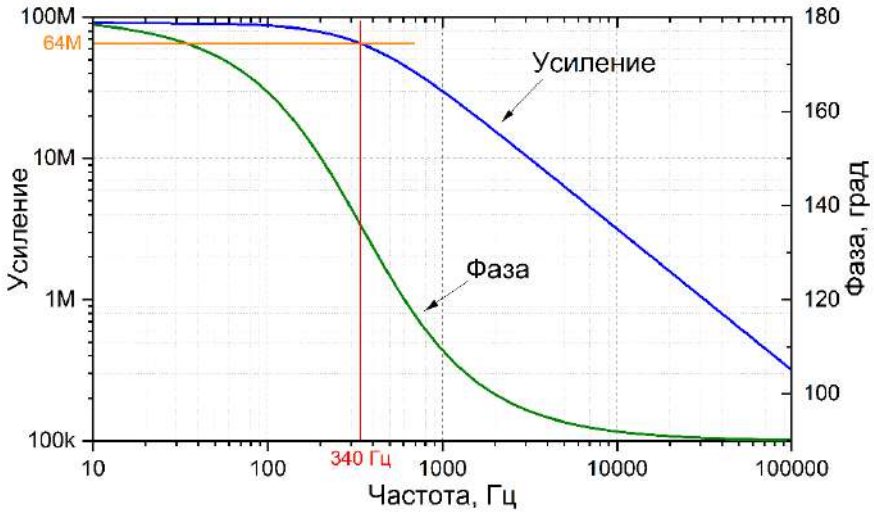



Рисунок 59. Диаграмма Боде ПТН с указанием частоты среза $f_{-3dB}$

## Ограничение скорости сканирования при использовании СС с аппаратным прерыванием

Как было показано выше, полоса пропускания ПТН ограничивается частотой 340 Гц. Из-за этого отклик на ступенчатое изменение тока имеет определенную задержку, примерно равную 200 мкс (Рисунок 60). Время срабатывания порогового детектора гораздо меньше (100 нс), чем задержка ПТН, поэтому задержкой порогового детектора можно пренебречь. Оценим максимальную скорость вытягивания сканера $v$ при фиксации его положения с точностью $\delta Z \sim$ 1нм при быстродействии ПТН~ 200 мкс:

$$v = \frac{1 * 10^{-9}}{200 * 10^{6}} = 5000 \text{ нм/с} \qquad (24)$$

Так как биологические образцы имеют значительный перепад высоты, то минимальный отвод, который задается для НП при сканировании обычно составляет 500 нм. Тогда при максимальной скорости подвода 5000 нм/с на один подвод НП к образцу потребуется 100 мс. Откуда следует, что максимальная скорость сканирования в плоскости образца (без учета времени на оцифровку сигнала и перемещение НП в плоскости XY) составляет 10 точек/с. Понятно, что для увеличения скорости сканирования следует использовать ПТН с лучшим быстродействием.

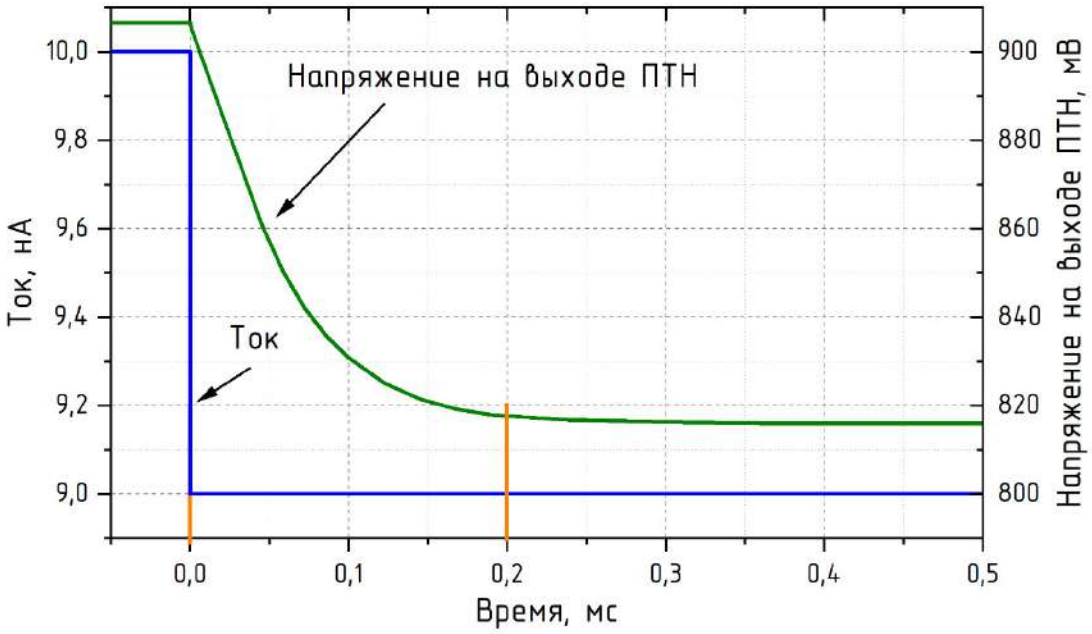



Рисунок 60. Отклик ПТН на ступенчатое входное воздействие

В Приложении 1 представлена схема разработанного нами ПТН с большим коэффициентом усиления и лучшим быстродействием. В обратной связи ОУ AD795 использован резистор с номинальным сопротивлением 1 ГОм. Сигнал с ОУ поступает на усилитель, ФНЧ и ФВЧ. Такая комбинация фильтров позволяет увеличить усиление в области более высоких частот, сместив частоту среза $f_{-3dB}$ вправо с сохранением стабильности работы ПТН (Рисунок 61).

Как следует из Рисунка 61, время отклика на ступенчатое воздействие для такой схемы ПТН составило примерно 75 мкс, что почти в 3 раза быстрее, чем в предыдущем варианте, а значит скорость сканирования можно поднять до 30 точек/с.

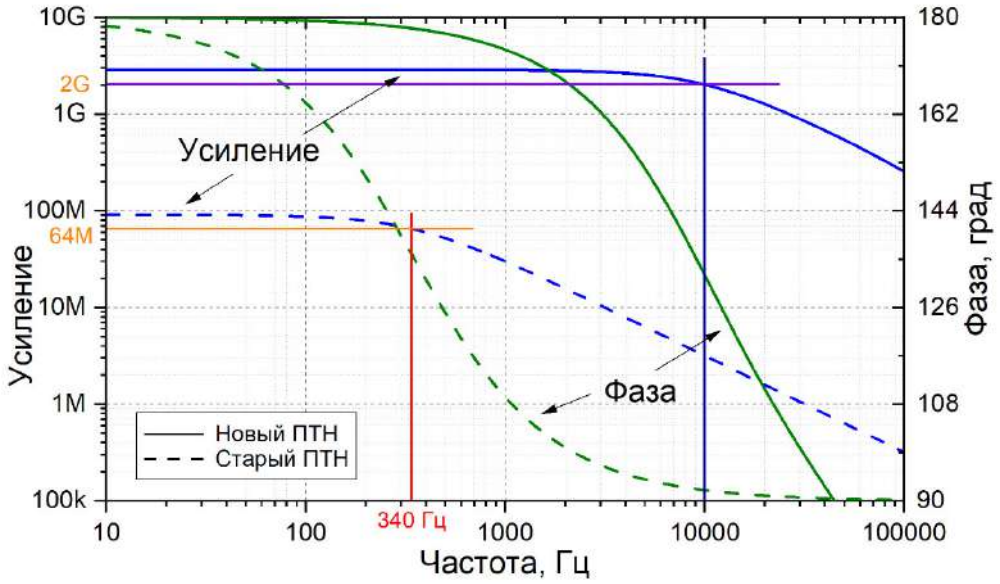



Рисунок 61. Диаграммы Боде для двух вариантов ПТН с указанием частот среза $f_{-3dB}$

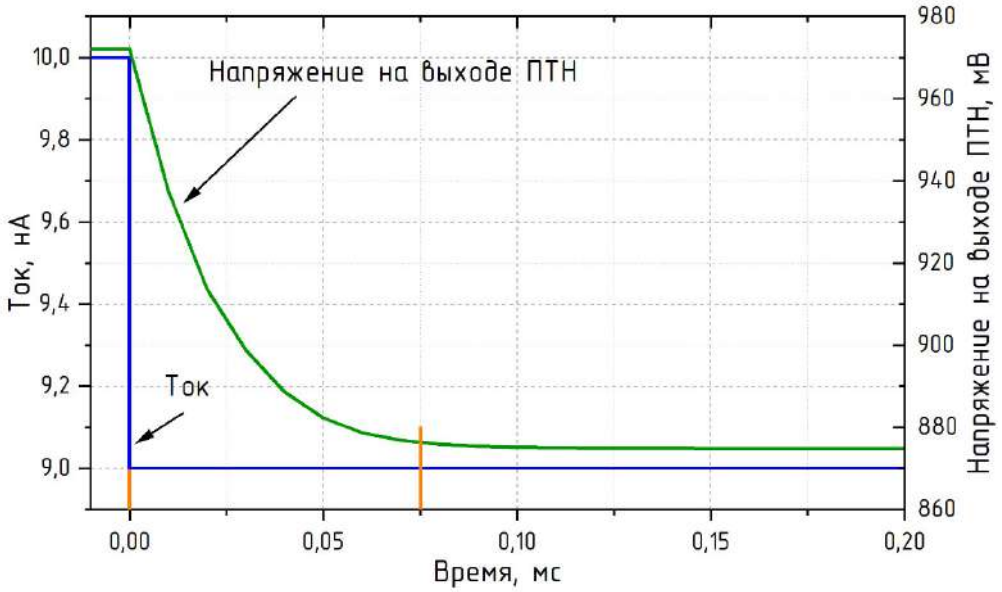



Рисунок 62. Отклик быстрого ПТН на ступенчатое входное воздействие

## Система управления и сбора данных СИПМ

Система управления СИПМ состоит из двух основных частей: блока управления и программы для ПК. Блок управления выполняет функции управления физическим узлом, реализации алгоритмов сканирования, спектроскопии, сбора информации и передачи ее в ПК. Программа на компьютере реализует обмен информацией с блоком управления и графический интерфейс для задания параметров работы СИПМ и визуализации результатов сканирования.

Блок управления состоит из основной платы с микроконтроллером RP2350, модуля АЦП на базе микросхемы AD7606, модулей ЦАП на базе микросхем DAC8563 и специально разработанных модулей для реализации аналоговой петли ОС, коммутации аналоговых сигналов, пороговых и пикового детектора тока, преобразователя ток-напряжение, платы предусилителя для пьезорезонансного силового датчика, платы управления инерциальным приводом и высоковольтных усилителей.

Модули, разрабатываемые самостоятельно были совмещены в одну плату с микроконтроллером (Рисунок 63)

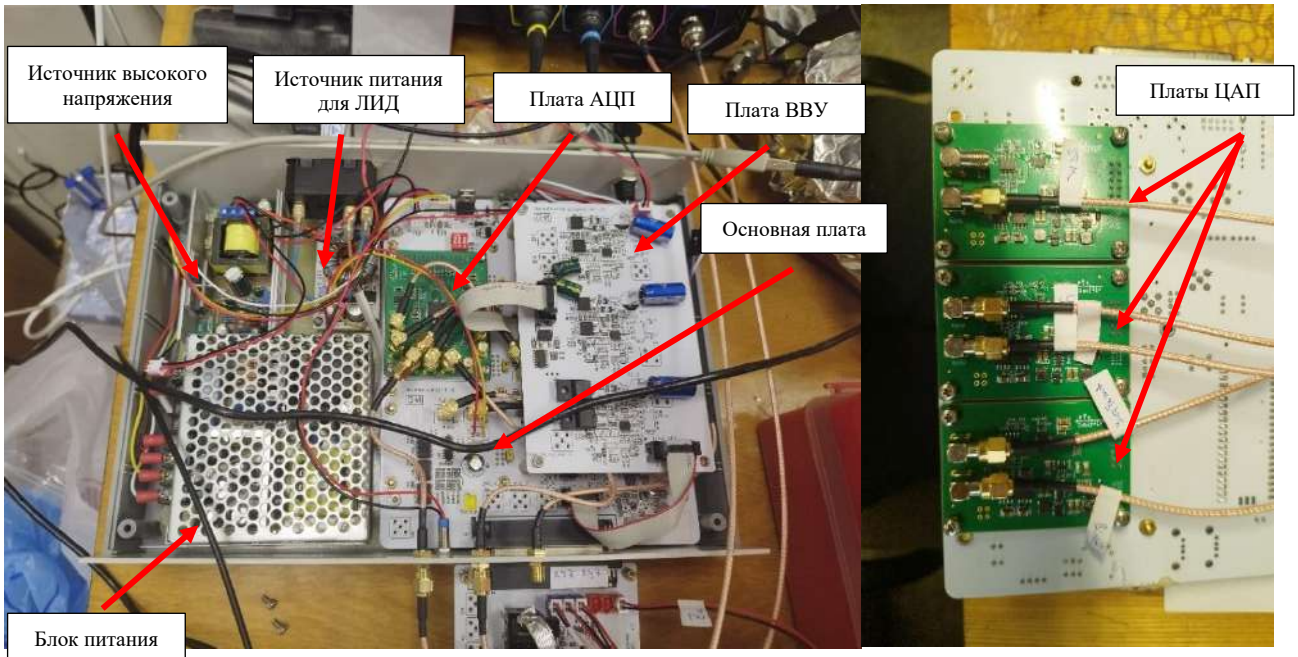



Рисунок 63. а – блок управления СИПМ в корпусе; б – обратная сторона основной платы с модулями ЦАП

Внешний вид разработанного интерфейса для управления СИПМ показан на Рисунке 64.

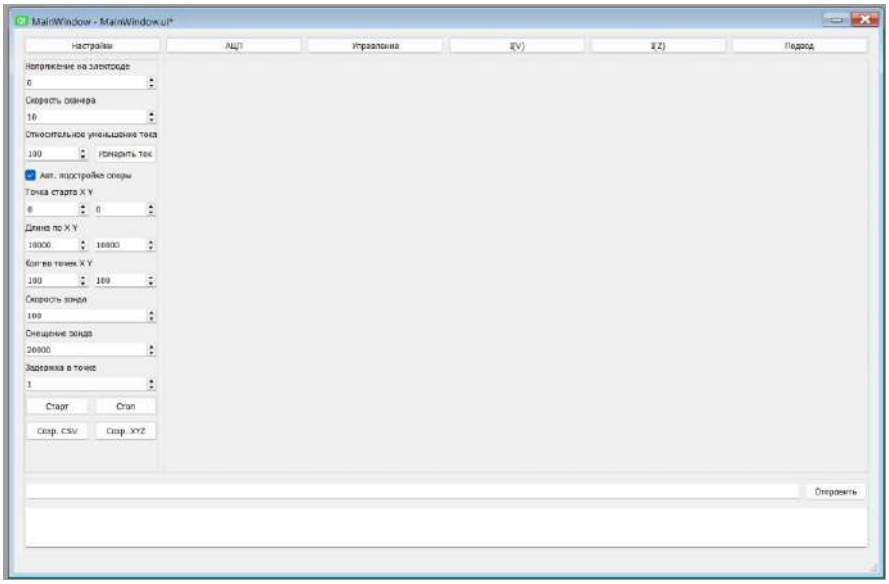


Рисунок 64. Внешний вид интерфейса для управления СИПМ

## 5.4 Результаты применения предложенных решений, увеличивающих быстродействие в СИПМ

Все эксперименты проводились в «hand-made» СЗМ (Рисунок 65). Изначально в микроскопе была реализована аналоговая СС с ОС, но для экспериментов с аппаратным прерыванием были дополнительно разработаны платы порогового и пикового детекторов (Рисунок 66).

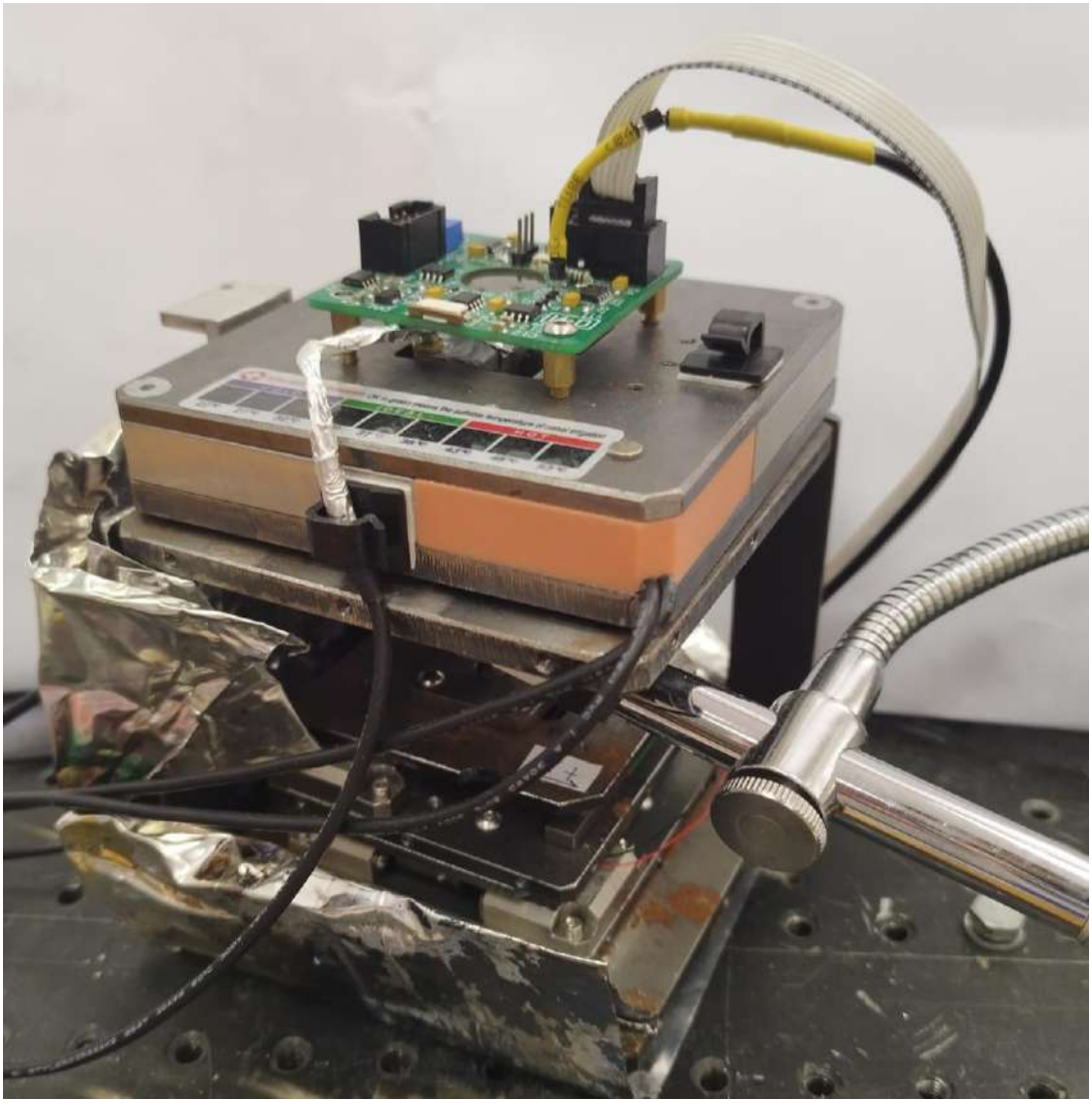


Рисунок 65. Фотография физического узла «hand-made» СЗМ, на котором проводилась экспериментальная апробация

Вольфрамовые зонды (Рисунок 67а) изготавливались с помощью электрохимического травления проволоки диаметром 0.15 мм на специализированной установке травления зондов, изготовленной компанией «НТ-СПб».

Для изготовления нанопипеток (Рисунок 67б) использовалась установка тепловой вытяжки PMP107 Multipipette Puller (MDI, США) (Рисунок 68). В качестве заготовок применялись боросиликатные капилляры BF120-69-10 (OD = 1.20 мм, ID =

0.69 мм, площадь поперечного сечения ≈ 3 мм²). Температура размягчения стекла составляла ~830 °C.

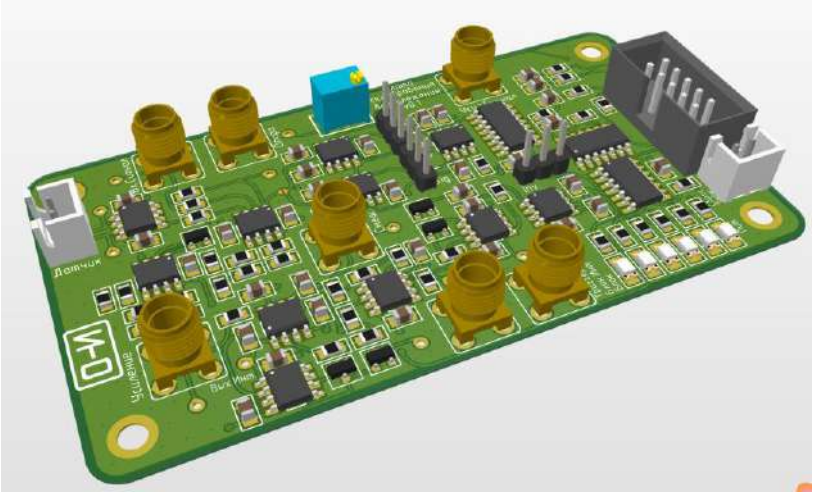


Рисунок 66. Разработанная плата порогового детектора тока

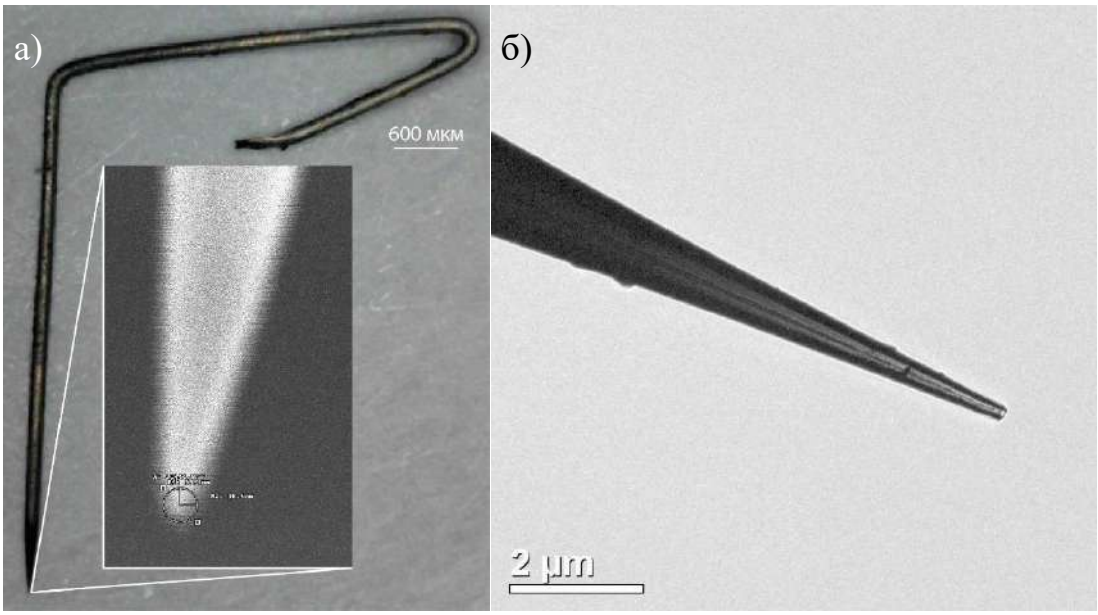



Рисунок 67. а) – СЭМ изображение W зонда; б) – ПЭМ изображение нанокапилляра

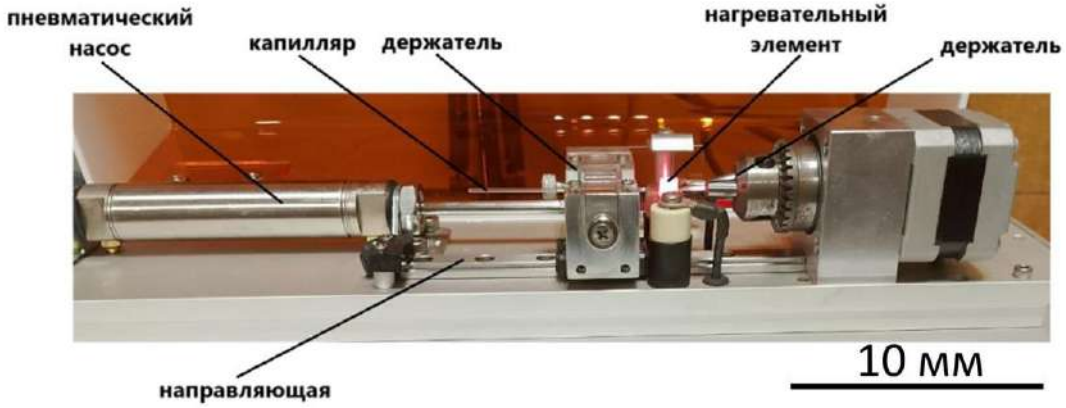



Рисунок 68. Общий вид установки тепловой вытяжки в процессе вытягивания НП

При работе в жидкости использовался фосфатно-солевой буфер (phosphate buffered saline, PBS), содержащий хлорид натрия, гидрофосфат натрия, хлорид калия и дигидрофосфат калия.

Электроды изготавливались из серебряной проволоки. Поверхность проволоки зачищалась абразивной бумагой с мелким зерном и хлорировалась для получения AgCl на поверхности. Для хлорирования серебра использовался раствор соляной кислоты (5…15%) и ПАВ. После хлорирования электроды промывались PBS раствором.

В качестве образцов использовались кремниевые калибровочные меры длины TGZ1, TGZ2, TGX1 производства компании NT-MDT (Рисунок 69). Поскольку СИПМ, вообще говоря, предназначен для исследования более мягких образцов, мы также использовали мягкие полимерные слепки с таких кремниевых калибровочных мер. Для получения слепка расплавленный термоклей наносился на кремниевую меру длины, выдерживалось время, достаточное для его застывания после чего слепок аккуратно снимался с меры длины.

Биологические образцы были предоставлены лабораторией ЛАБИД СПбПУ Фиксированные (обработанные в формалине) нейрональные клетки (Рисунок 70) были дифференцированы из эпителиальных, на стеклянной подложке, модифицированной монослоем поли-L-лизина.

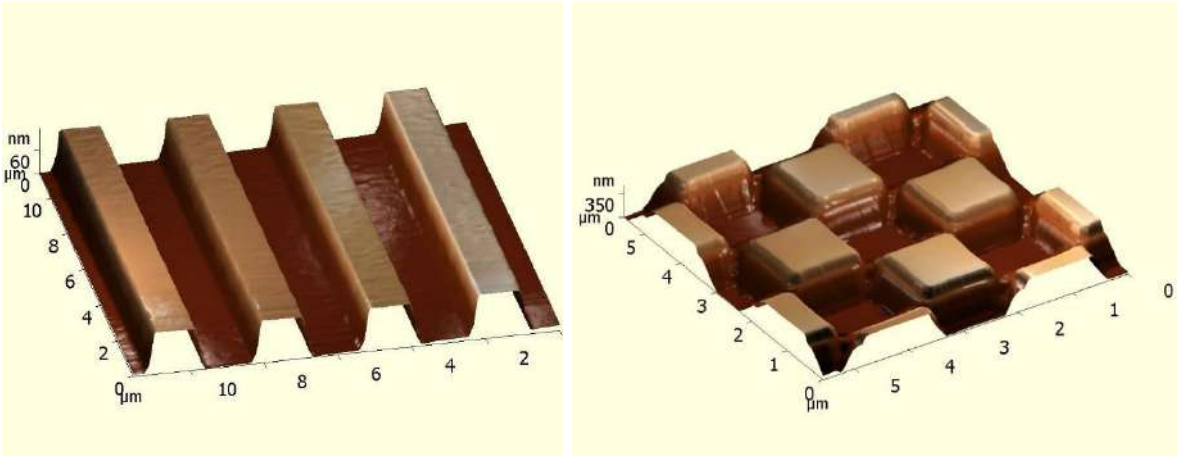



Рисунок 69. а) – АСМ изображение решетки TGZ2 (высота ступени 110нм); б) – АСМ изображение решетки TGX1

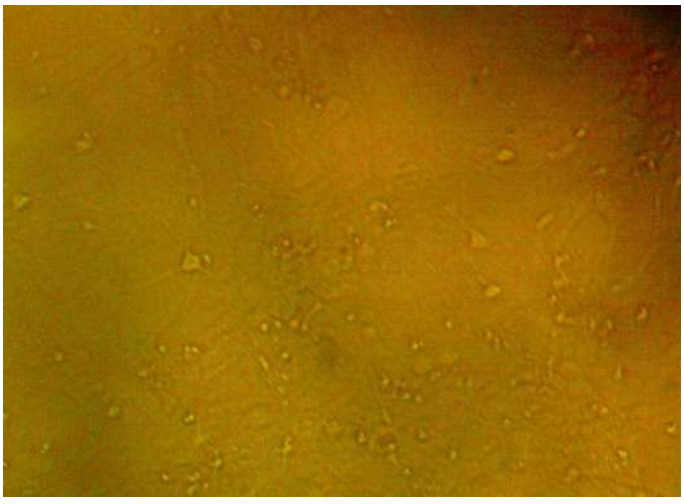


Рисунок 70. Изображение нейрональных клеток в оптическом микроскопе

## Испытания алгоритма уменьшения времени получения изображения в «hopping» моде СИПМ

На одном тестовом образце было проведено сканирование с использованием стандартного алгоритма (Рисунок 71а) и адаптивного алгоритма с подставкой напряжения на входе ВВУ (Рисунок 71б) и проведено сравнение времени, затрачиваемого на получение одного кадра размером 10x10 мкм$^2$ с разрешением 100x100 точек, при этом коэффициенты усиления в петле ОС не изменялись. В качестве тестового образца использовался полимерный слепок с тестовой решетки TGZ2. Высота ступенек на исходной кремниевой матрице равнялась 110 нм. После снятия полимерной реплики возникали случайные искажения рельефа, и с учетом наклона образца перепад высот составлял ~500 нм. Поэтому высота фиксированного отвода НП (stepZ) выбиралась равной 700 нм. Сканирование полимерного слепка производилось в 1% растворе NaCl. В результате получено четырехкратное сокращением времени сканирования по сравнению со стандартным алгоритмом с 23 мин 36 сек (14.16 сек на линию) до 6 мин 18 сек (3.78 сек на линию).

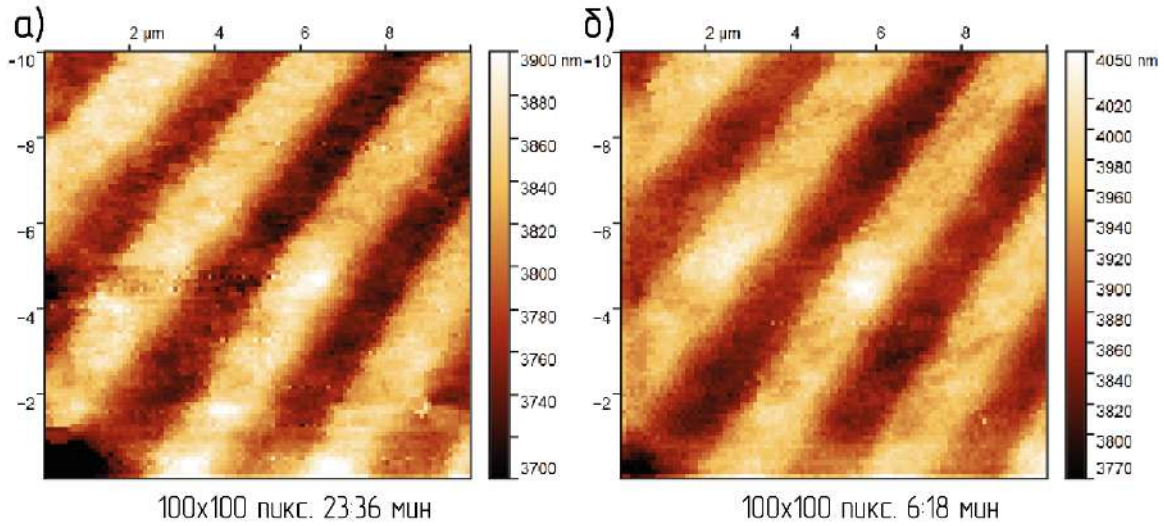



Рисунок 71. Результат сканирования тестового образца в «hopping» моде без и с использованием предложенного адаптивного алгоритма. Число точек в кадре 100x100, диаметр апертуры НП ~100 нм, напряжение смещения на AgCl электродах – 0.3 В, ионный ток – 1.2 нА, высота отвода НП в адаптивном алгоритме отвод Z – 700 нм

## Испытания алгоритма сканирования с аппаратным прерыванием

Предложенный алгоритм с аппаратным прерыванием позволил стабильно получать изображения твердых образцов в СИПМ. Ранее, при использовании «hopping» моды СИПМ, работа с такими образцами была проблематична и не стабильна из-за повреждения зонда при случайном контакте с образцом. При использовании алгоритма с аппаратным прерыванием время нахождения НП вблизи образца минимально, из-за чего ниже риск контакта зонда с образцом.

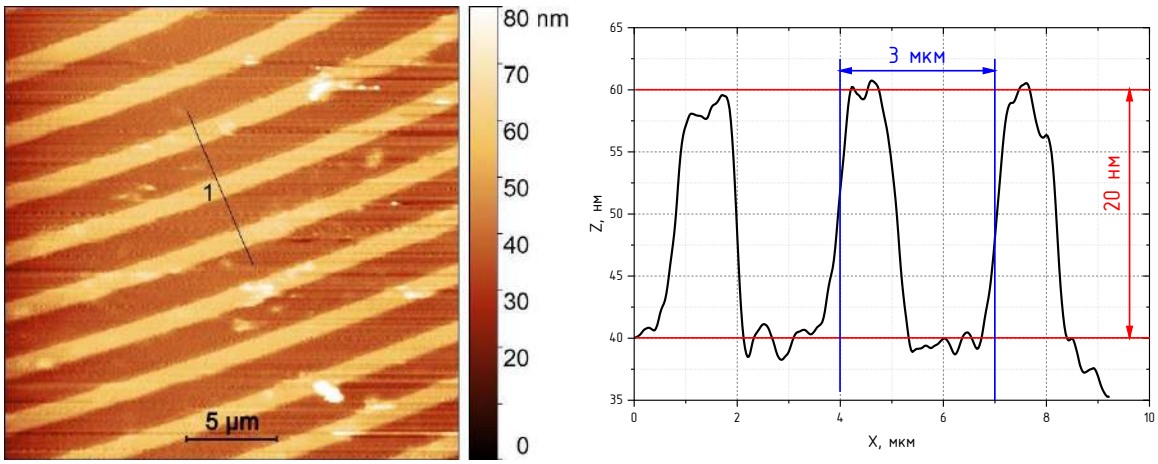



Рисунок 72. Результат сканирования кремниевой калибровочной меры длины TGZ1 (слева); сечение полученного изображения (справа). Число точек в кадре 300x300, диаметр апертуры НП ~100 нм, напряжение смещения на AgCl электродах – 0.3 В, ионный ток – 1.2 нА, высота отвода НП в адаптивном алгоритме отвод Z – 300 нм, скорость сканирования 50 точек в секунду

С целью определения максимальной скорости сканирования в данном режиме был выбран малый участок, на котором производилось сканирование с минимальной высотой отвода НП в 50 нм. Таким образом удалось развить скорость в 200 точек в секунду. Это показывает не только стабильность метода при работе хрупкой НП с твердым образцом, но и возможность увеличения скорости сканирования при использовании описанных выше методик.

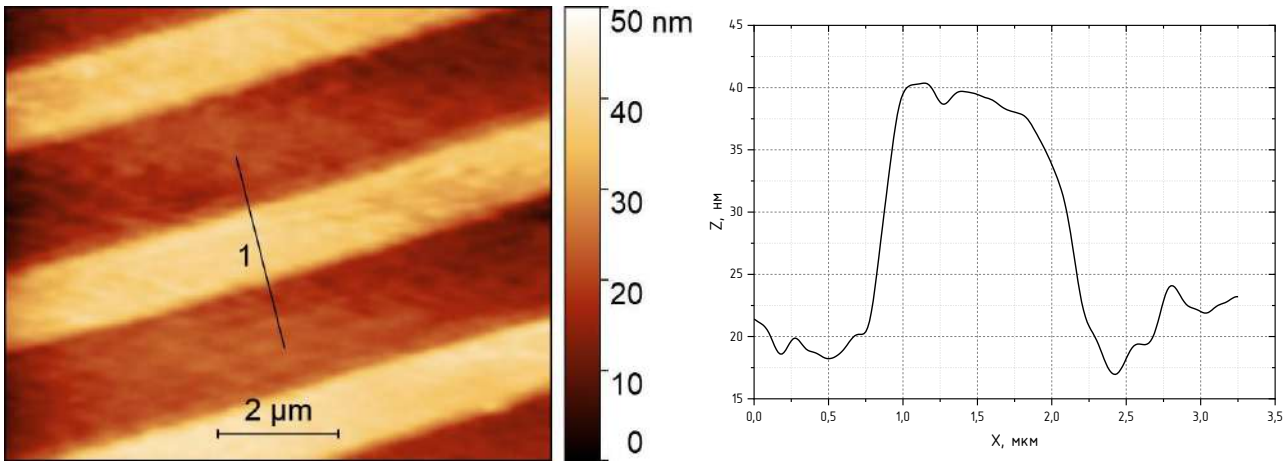



Рисунок 73. Результат сканирования кремниевой калибровочной меры длины TGZ1 (слева); сечение полученного изображения (справа). Число точек в кадре 200x200, диаметр апертуры НП ~100 нм, напряжение смещения на AgCl электродах – 0.3 В, ионный ток – 1.2 нА, высота отвода НП в адаптивном алгоритме отвод Z – 300 нм, скорость сканирования 200 точек в секунду

## Сканирование биологических образцов

Сканирование нейрональных клеток производилось по большой площади с целью поиска одиночных нейронов. СИПМ изображение поверхности образца показано на Рисунке 74. Стоит отметить, что данные образцы имеют большой перепад

высоты, из-за чего высота отвода НП составляла 10 мкм, а скорость сканирования составляла ≈15 точек в секунду.

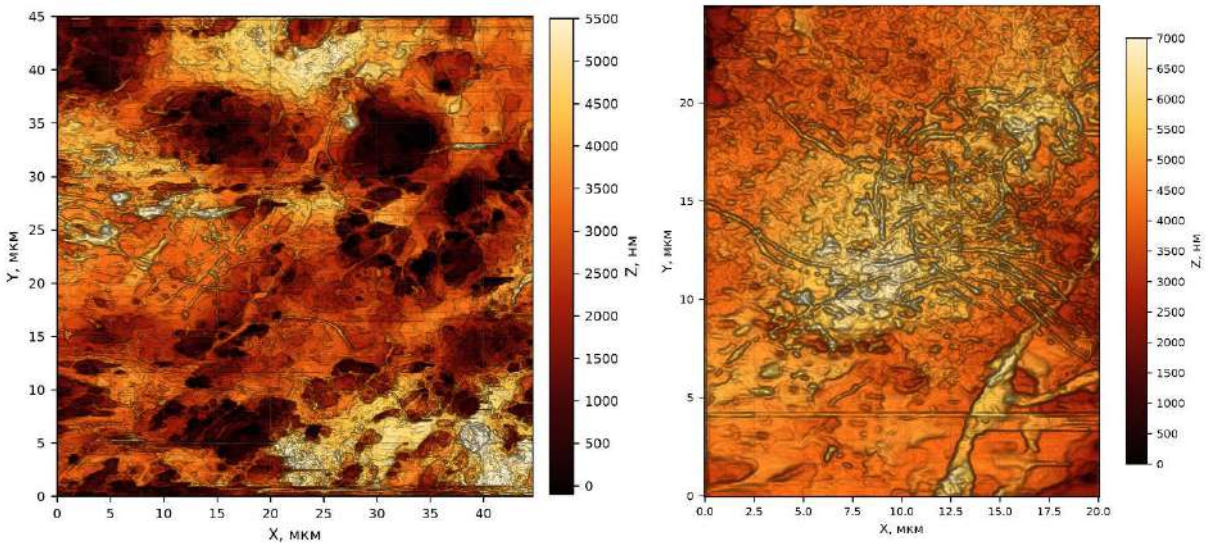



Рисунок 74. Общий вид поверхности образца с нейрональными клетками. Число точек в кадре 450x450 (слева) и 200x250 (справа), диаметр апертуры НП ~100 нм, напряжение смещения на AgCl электродах – 0.3 В, ионный ток – 1.2 нА, высота отвода НП в адаптивном алгоритме отвод Z – 10 мкм, скорость сканирования 15 точек в секунду

## Сканирование кремниевой решётки с аппаратным прерыванием и использованием дополнительных каналов в режиме ССМ

Несмотря на то, что сканирование с аппаратным прерыванием было разработано для СИПМ, данный алгоритм может быть использован и при работе в ССМ, что было показано при сканировании решетки TGX1 с использованием пьезорезонансного камертонного датчика на второй колебательной моде и вольфрамового травленного зонда. На Рисунке 75 показаны результаты сканирования кремниевой решетки. На разнице изображений с первых двух каналов (Рисунок 75в) более контрастно видна граница между выступами, характерная для ССМ изображений решетки TGX1 (Рисунок 69).

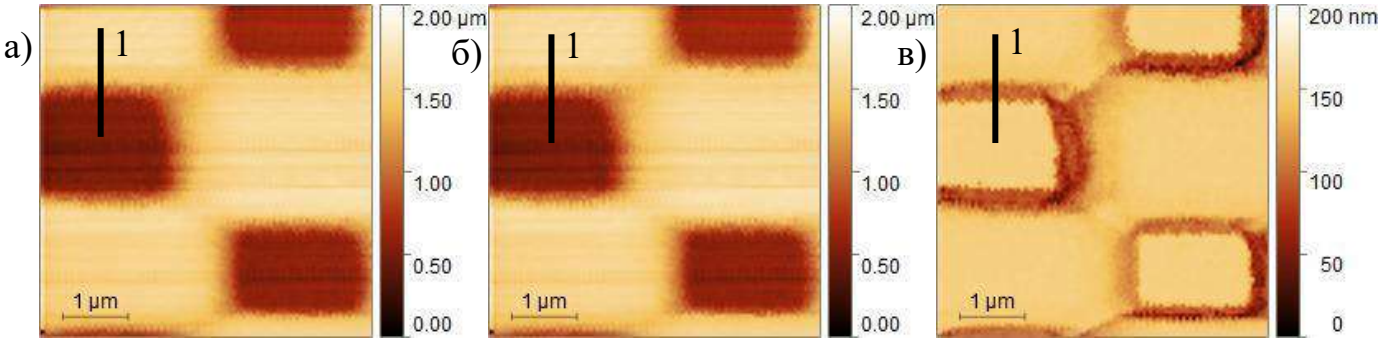



Рисунок 75. Визуализация данных, полученных с трех измеренных каналов: а) – карта высоты, на который срабатывал пороговый детектор, настроенный на падение амплитуды на 10% от значения в дали от образца, б) – карта высоты, на который

срабатывал пороговый детектор, настроенный на падение амплитуды на 14% от значения в дали от образца, в) – разность первых двух каналов (изображений а и б)

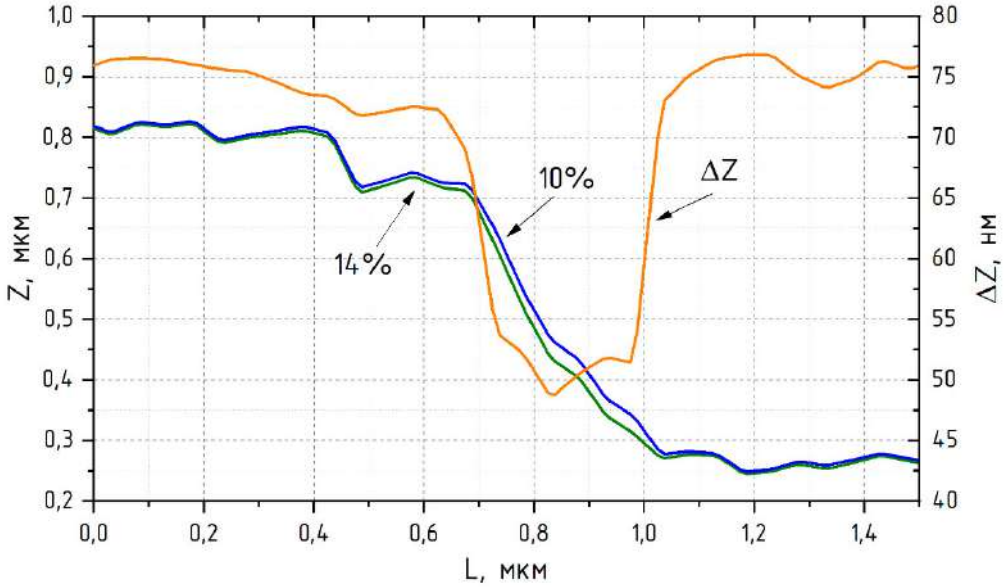



Рисунок 76. Сечение данных, показанных на Рисунке 75, по линии 1

## Сканирование биологических образцов с аппаратным прерыванием и использованием дополнительных каналов

Сканирование производилось на образце нейрональных клеток шагом 450 нм. Первые два канала (а и б на Рисунке 77) ожидаемо описывают поверхность образца, но из-за разного порога срабатывания детектора между ними имеется расхождение, показанное на Рисунке 77г. По разнице этих изображений видно, что большая крутизна характеристики I(Z) (более темные области) соответствует границе аксонов, которые как паутина покрывают всю площадь образца. Это связано с тем, что при движении НП рядом с крутым рельефом (в данном случае аксоном) происходит большее падение тока, вызванное влиянием стенки рельефа.

На изображении сигнала с пикового детектора (Рисунок 77в) видно три темных участка, которые соответствуют наибольшими выступами образца на Рисунке 77а. Данный образец не имеет характерной разности локальных поверхностных зарядов, но при этом в сигнале с пикового детектора наблюдаются подобные артефакты, которые можно объяснить как особенностями клеточной мембраны в этом месте, так и чрезмерным выступом образца, из-за чего даже после отвода зонда значение тока не увеличивалось до исходного значения тока в дали от образца.

При повторном сканировании этого же образца, но с шагом в 150 нм можно более детально рассмотреть части нейрональных клеток (Рисунок 78а и б), а на разности первых двух каналов (Рисунок 78в) более контрастно видны границы аксонов. На Рисунке 79 показано сечение изображений, полученных с трех каналов. По сечению видно, что на границе объекта (аксона) наблюдается более резкое падение тока при приближении НП к образцу, что позволяет получить более контрастное изображение рельефа образца.

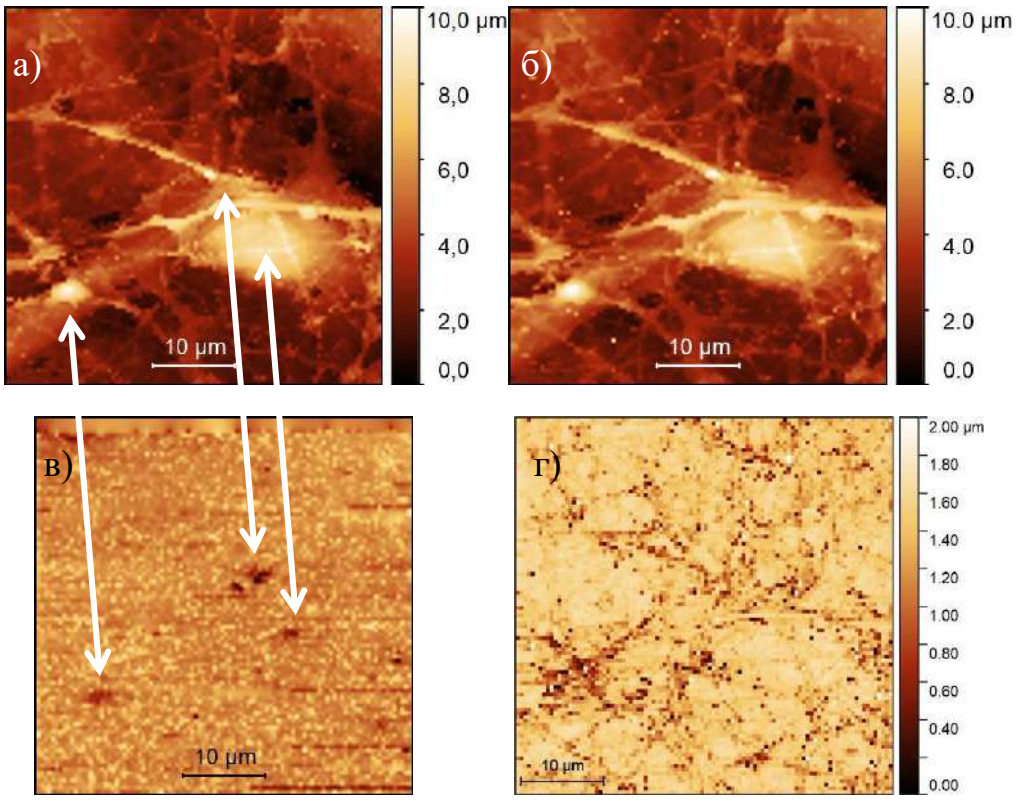



Рисунок 77. Визуализация данных, полученных с трех измеренных каналов: а) – карта высоты, на который срабатывал пороговый детектор, настроенный на падение тока 10% от значения тока в дали от образца, б) – карта высоты, на который срабатывал пороговый детектор, настроенный на падение тока 8% от значения тока в дали от образца, в) – сигнал с пикового детектора тока, г) – разность первых двух каналов (изображений а и б)

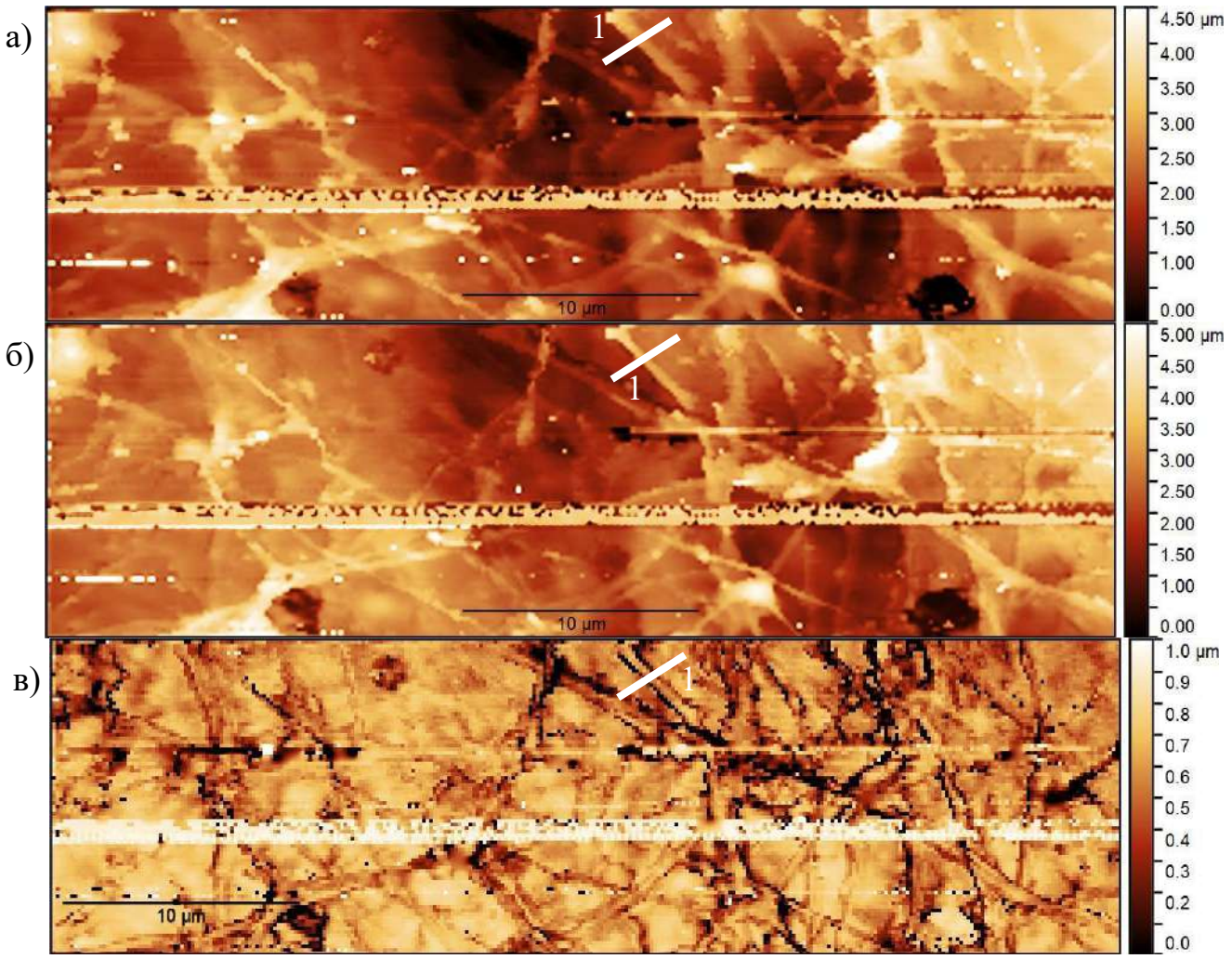



Рисунок 78. Визуализация данных, полученных с трех измеренных каналов: а) – карта высоты, на который срабатывал пороговый детектор, настроенный на падение тока 10% от значения тока в дали от образца, б) – карта высоты, на который срабатывал пороговый детектор, настроенный на падение тока 8% от значения тока в дали от образца, в) – разность первых двух каналов (изображений а и б)

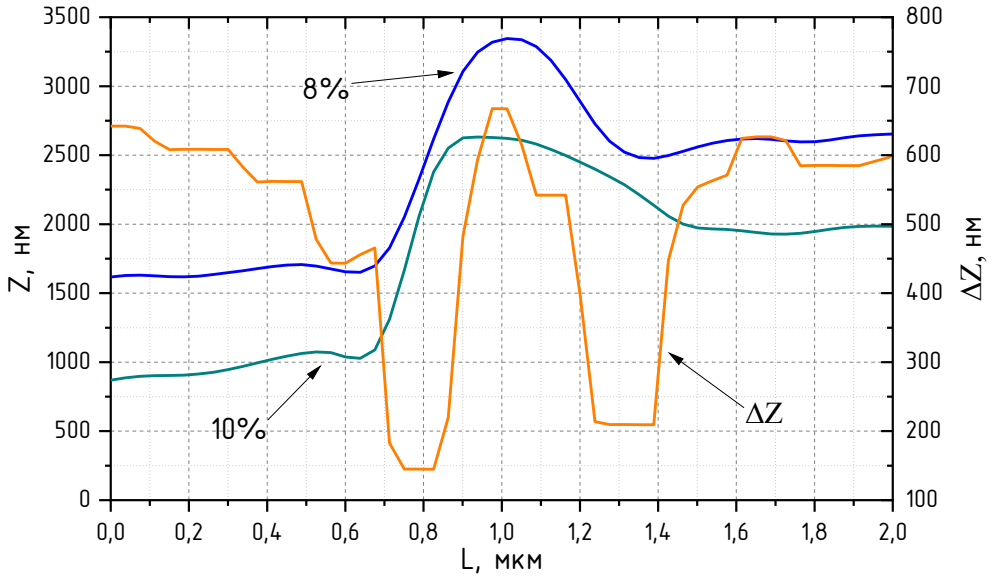



Рисунок 79. Сечение данных, показанных на Рисунке 78, по линии 1

## 5.5. Выводы

На основании проведённых экспериментальных исследований разработанных аппаратно-программных средств могут быть сформулированы следующие выводы:

Адаптивный алгоритм сканирования с уменьшением высоты отвода нанопипетки (с подставкой напряжения) обеспечивает четырёхкратное сокращение времени получения изображения в hopping-моде СИПМ по сравнению со стандартным алгоритмом с полным отводом зонда. Для полимерного слепка решётки TGZ2 время сканирования кадра размером 10×10 мкм² с разрешением 100×100 точек сократилось с 23 мин 36 с до 6 мин 18 с при сохранении качества топографического изображения. Достигнутое ускорение подтверждает эффективность предложенного подхода, основанного на введении сумматора в петлю обратной связи и формировании управляемой подставки с помощью ЦАП.

Разработанный алгоритм сканирования с аппаратным прерыванием (без обратной связи, с пороговым детектированием тока) позволяет стабильно получать СИПМ-изображения как твёрдых, так и мягких биологических образцов с существенно меньшим риском повреждения зонда благодаря минимизации времени нахождения нанопипетки вблизи поверхности. На кремниевой калибровочной мере TGZ1 достигнута скорость сканирования до 200 точек/с при высоте отвода 50 нм. Для нейрональных клеток с перепадом высот до 10 мкм скорость сканирования составила ~15 точек/с при размере кадра до 450×450 точек. Продемонстрирована высокая стабильность работы хрупких нанокапилляров при сканировании твёрдых образцов в данном режиме.

Использование двух пороговых детекторов с разными уровнями срабатывания и пикового детектора тока позволяет в процессе одного сканирования одновременно регистрировать три информационных канала без увеличения времени измерения. Разность двух топографических каналов (при порогах 8% и 10% от тока насыщения) обеспечивает контрастное выделение границ аксонов на изображениях нейрональных клеток, что обусловлено более резким падением ионного тока при движении нанопипетки вблизи крутых участков рельефа. Сигнал с пикового детектора фиксирует локальные неоднородности мембраны и топографические выступы. Аналогичный подход успешно апробирован в режиме ССМ с использованием пьезорезонансного камертонного датчика.

### Положение, выносимое на защиту:

Аппаратное прерывание сканирования по пороговому значению тока и совместное использование двух пороговых детекторов и пикового детектора улучшает быстродействие сканирующего ион-проводящего микроскопа по сравнению с использованием непрерывного регулятора, и позволяет за один цикл подвода нанопипетки регистрировать топографию поверхности, угол наклон спадающей ветви кривой подвода I(Z) и максимальное значение ионного тока.

# Заключение

Таким образом в результате проведенных исследований предложен комплексный подход к повышению быстродействия сканирующей ион-проводящей микроскопии. Повышение быстродействия метода СИПМ достигается в результате использования сбалансированного пьезосканера точного позиционирования с демпфированием низкочастотного резонанса и компактного прецизионного привода сближения зонда с образцом на основе пьезоактюатора, совместно с алгоритмами, сокращающими длину “hopping” траектории и время захвата взаимодействия. Исследован резонансный силовой зондовый датчик на основе камертона, составленного из двух пьезокерамических трубок, и предложено использовать стеклянную нанопипетку в качестве зонда. Показано, что измерения на частоте второго резонанса электромеханического пьезокамертона, улучшает быстродействие метода. Достоверность полученных результатов подтверждается согласием экспериментальных данных с модельными расчетами. Полученные результаты полностью соответствуют задачам диссертационной работы и являются развитием метода неинвазивной ион-проводящей микроскопии, направленной, в первую очередь, на диагностику биологических объектов. Отметим также, что предложенные в работе способы улучшения быстродействия СИПМ могут представлять интерес и для других разновидностей СЗМ, включая сканирующую туннельную, силовую или оптическую ближнепольную микроскопии.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность коллективу Лаборатории сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии Института Аналитического Приборостроения РАН за творческое сотрудничество. А также к.ф.-м.н. Горбенко О.М., к.ф.-м.н. Фельштыну М.Л., Сапожникову И.Д., к.ф.-м.н. Лукашенко С. Ю., к.т.н. Жукову М.В. и д.ф.-м.н. Голубку А.О. за помощь в организации и выполнении работы, ценные советы и плодотворные обсуждения результатов работы.

# Список литературы


1. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy // Physical Review Letters. – 1982. – Vol. 49, No. 1. – P. 57–61. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.57.
2. Бинниг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности // Успехи физических наук. – 1988. – Т. 156, № 2. – С. 341–352.
3. Binnig G., Rohrer H. The Scanning Tunneling Microscope // Scientific American. – 1985. – Vol. 253, No. 2. – P. 50–56.
4. Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic Force Microscope // Physical Review Letters. – 1986. – Vol. 56, No. 9. – P. 930–933. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.56.930.
5. Быков В.А. Сканирующая зондовая микроскопия и спектроскопия, состояние, тенденции развития и уровень разработок в России // Scanning Probe Microscopy. Abstract Book of International Conference. – 2017. – С. 1–2.
6. Патент № 2297072 Российская Федерация, МПК H01J 37/28, G01B 11/08, H01L 41/09. Инерционный двигатель : № 2005134280/28 : заявл. 08.11.2005 : опубл. 10.04.2007 / Быков В.А., Голубок А.О., Котов В.В., Сапожников И.Д. ; заявитель ЗАО "Нанотехнология-МДТ". – 7 с. : ил.
7. Lin Y., An D., Lin Z., Chen X., Huang W. Progress in high-performance stick-slip piezoelectric actuators: a review // International Journal of Smart and Nano Materials. – 2024. – Vol. 15, No. 3. – P. 652–696. – DOI: 10.1080/19475411.2024.2395293.
8. Hunstig M., Hemsel T., Sextro W. Stick-slip and slip-slip operation of piezoelectric inertia drives – Part I: Ideal excitation // Sensors and Actuators A: Physical. – 2013. – Vol. 200. – P. 90–100. – DOI: 10.1016/j.sna.2012.11.012. – Preprint available at: https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.11.012
9. Горбенко О.М., Жуков М.В., Пичахчи С.В., Сапожников И.Д., Фельштын М.Л., Голубок А.О. Компактная головка сканирующего зондового микроскопа на основе инерциальных движителей, использующих пьезопакеты // Научное приборостроение. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 3–22.
10. Wadikhaye S.P., Yong Y.K., Moheimani S.O.R., et al. Design of a compact serial-kinematic scanner for high-speed atomic force microscopy: an analytical approach // Micro & Nano Letters. – 2012. – Vol. 7, No. 11. – P. 1152–1155. – DOI: 10.1049/mnl.2011.0557.
11. Fleming A.J., Aphale S.S., Moheimani S.O.R. A New Method for Robust Damping and Tracking Control of Scanning Probe Microscope Positioning Stages // IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2010. – Vol. 9, No. 4. – P. 438–448. – DOI: 10.1109/TNANO.2009.2032418.
12. Zhao J., Gong W., Cai W., Shang G. Piezoelectric bimorph-based scanner in the tip-scan mode for high speed atomic force microscope // Review of Scientific Instruments. – 2013. – Vol. 84, No. 8. – Art. no. 083706. – DOI: 10.1063/1.4818976.

13. Zhou Y., Shang G., Cai W., Yao J. Cantilevered bimorph-based scanner for high speed atomic force microscopy with large scanning range // Review of Scientific Instruments. – 2010. – Vol. 81, No. 5. – Art. no. 053708. – DOI: 10.1063/1.3428731.
14. Мещеряков В.В., Матюхин М.В., Андреев М.А. Методы уменьшения времени сканирования СЗМ при сохранении качества изображения // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2013. – № 3 (53). – С. 15–22.
15. Zhang L., Chen X., Huang J., et al. A method to correct hysteresis of scanning probe microscope images based on a sinusoidal model // Review of Scientific Instruments. – 2019. – Vol. 90, No. 2. – Art. no. 023704. – DOI: 10.1063/1.5052281.
16. Kuiper S., Schitter G. Active damping of a piezoelectric tube scanner using self-sensing piezo actuation // Mechatronics. – 2010. – Vol. 20, No. 6. – P. 656–665. – DOI: 10.1016/j.mechatronics.2010.07.005.
17. Kodera N., Yamashita H., Ando T. Active damping of the scanner for high-speed atomic force microscopy // Review of Scientific Instruments. – 2005. – Vol. 76, No. 5. – Art. no. 053708. – DOI: 10.1063/1.1903123.
18. Schitter G., Åström K.J., DeMartini B.E., et al. Design and Modeling of a High-Speed Scanner for Atomic Force Microscopy // Proceedings of the 2006 American Control Conference. – Minneapolis, USA, 2006. – P. 742–747. – DOI: 10.1109/ACC.2006.1655426.
19. Watanabe S., Ando T. High-speed XYZ-nanopositioner for scanning ion conductance microscopy // Applied Physics Letters. – 2017. – Vol. 111, No. 11. – Art. no. 113106. – DOI: 10.1063/1.4986460.
20. Fleming A.J., Teo Y.R., Leang K.K. Low-Order Damping and Tracking Control for Scanning Probe Systems // Frontiers in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 1. – Art. no. 14. – DOI: 10.3389/fmech.2015.00014.
21. Clayton G.M., Tien S., Leang K.K., et al. A Review of Feedforward Control Approaches in Nanopositioning for High-Speed SPM // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2009. – Vol. 131, No. 6. – Art. no. 061101. – DOI: 10.1115/1.4000158.
22. Строгонов А.В. Реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов в базисе программируемых логических интегральных схем : учебное пособие / А.В. Строгонов ; под ред. В.П. Кирьянова. – 2-е изд., испр. – М. : МИЭТ, 2016. – 120 с. – ISBN 978-5-7256-0870-8.
23. Sumaiya S. A., Baykara M. Z. Atomic-scale imaging and spectroscopy via scanning probe microscopy: An overview // Journal of Vacuum Science and Technology B. — 2023. — Vol. 41, No. 6. — P. 060802. — DOI: 10.1116/6.0002889
24. Стовпяга А.В. Технология создания и исследование пьезорезонансных зондовых датчиков для сканирующего зондового микроскопа : дис. … канд. техн. наук : 05.27.01 / Стовпяга Александр Владимирович. – СПб., 2012. – 145 с.

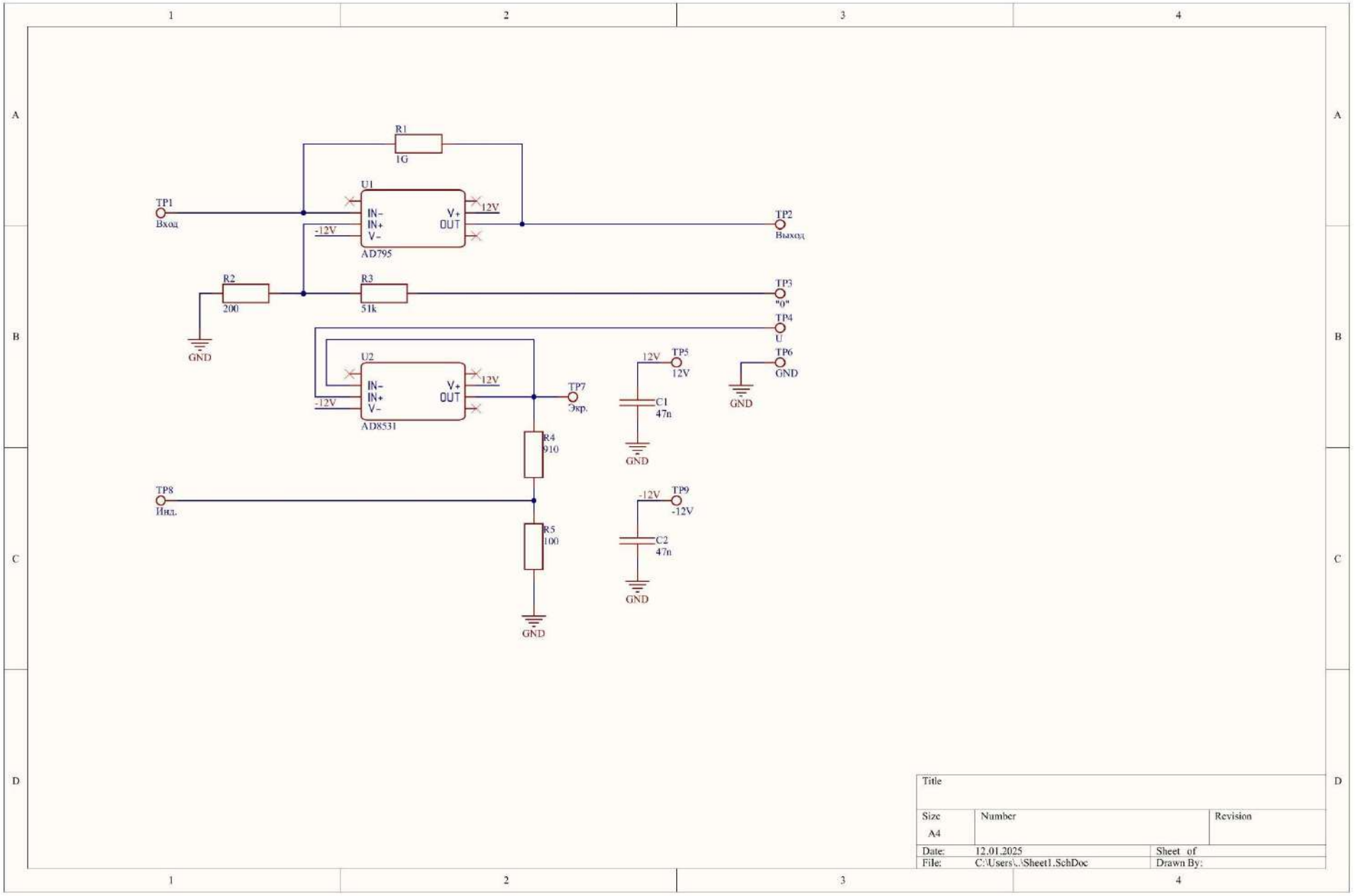
25. Putman C.A.J., De Grooth B.G., Van Hulst N.F., Greve J. A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy // Journal of Applied Physics. – 1992. – Vol. 72, No. 1. – P. 6–12. – DOI: 10.1063/1.352149.
26. Анкудинов А.В. Диагностика наноустройств методами сканирующей зондовой микроскопии : дис. … д-ра физ.-мат. наук : 01.04.01 / Анкудинов Александр Витальевич. – СПб., 2015. – 297 с.
27. Pruchnik B., Kopczyński W., Korpelainen V., et al. Application of active piezoresistive cantilevers in high-eigenmode surface imaging // Measurement Science and Technology. – 2024. – Vol. 35, No. 12. – Art. no. 125701. – DOI: 10.1088/1361-6501/ad77c8.
28. Potocký Š., Kuliček J., Ukraintsev E., et al. Coating of Self-Sensing Atomic Force Microscopy Cantilevers with Boron-Doped Nanocrystalline Diamond at Low Temperatures // Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science. – 2024. – Vol. 221, No. 24. – Art. no. 2400553. – DOI: 10.1002/pssa.202400553.
29. Giessibl F.J. Atomic force microscopy with qPlus sensors // Materials Today. – 2005. – Vol. 8, No. 5, Suppl. 2. – P. 32–41. – DOI: 10.1016/S1369-7021(05)00816-7.
30. Nony L., Couchman S., Uhl D., et al. Stiffness calibration of qPlus sensors at low temperature through thermal noise measurements // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2012. – Vol. 3. – P. 562–570. – DOI: 10.3762/bjnano.3.65.
31. Ichii T., Negami M., Fujimura M., et al. Structural Analysis of Ionic-liquid/Organic-monolayer Interface by Phase Modulation Atomic Force Microscopy Utilizing a Quartz Tuning Fork Sensor // Electrochemistry. – 2014. – Vol. 82, No. 5. – P. 380–384. – DOI: 10.5796/electrochemistry.82.380.
32. Васильев А.А., Керпелева С.Ю., Котов В.В., Сапожников И.Д., Голубок А.О. Датчик локального силового и туннельного взаимодействий в сканирующем зондовом микроскопе // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15, № 1. – С. 62–69.
33. Пат. 2297053 Российская Федерация, МПК G01Q 60/00. Зондовый датчик на основе кварцевого резонатора для сканирующего зондового микроскопа / С.Д. Ю.; заявитель и патентообладатель ООО "НТ-МДТ". – № 2006122452/28 ; заявл. 26.06.2006 ; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10. – 8 с.
34. Лапшин Д. А., Решетов В. Н., Секацкий С. К., Летохов В. С. Контактная сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1998. Т. 67, № 5. С. 311–315.
35. Lapshin D. A., Reshetov V. N., Sekatskii S. K., Letokhov V. S. Contact mode near-field microscope // Ultramicroscopy. 1999. Vol. 76, No. 1–2. P. 13–20. DOI: 10.1016/S0304-3991(98)00066-7.
36. Ossola D., Dorwling-Carter L., Dermutz H., et al. Simultaneous Scanning Ion Conductance Microscopy and Atomic Force Microscopy with Microchanneled Cantilevers // Nano Letters. – 2015. – Vol. 15, No. 5. – P. 3246–3252. – DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b00438.

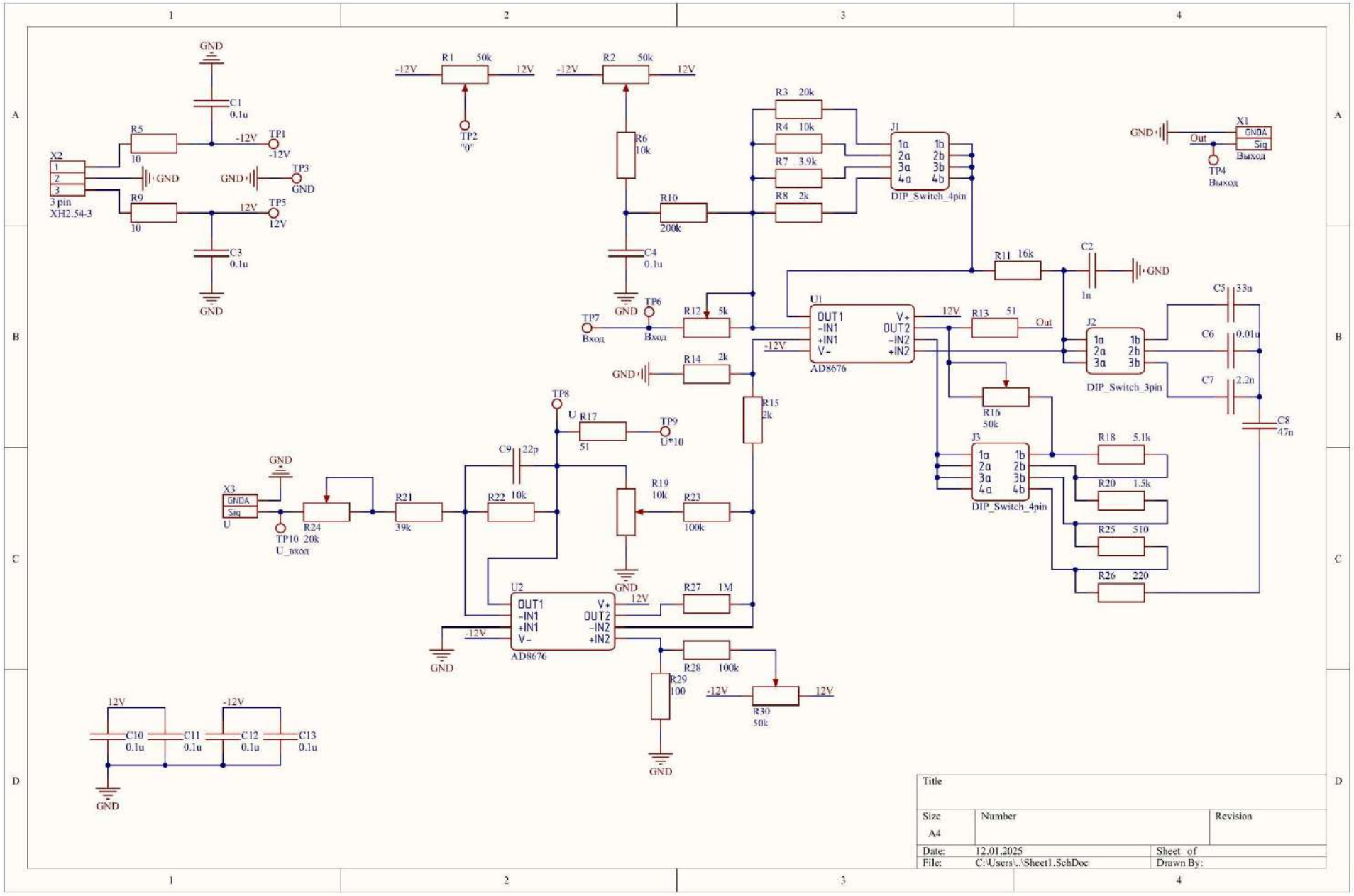
37. Li M., Liu L., Zambelli T. FluidFM for single-cell biophysics // Nano Research. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – P. 773–786. – DOI: 10.1007/s12274-021-3573-0.
38. Mikhail L. Felshtyn, Olga M. Gorbenko, Stanislav Yu. Lukashenko, Ivan D. Sapozhnikov, Mikhail V. Zhukov, Alexander O. Golubok. Study of the Mechanical Stability of Glass Nanopipettes under Force Loads //Analytical Chemistry 2026, 98, 12, 8863-8870
39. Lukashenko S.Yu., Gorbenko O.M., Felshtyn M.L., et al. Ionic conductivity in nanopipettes: experiment and model // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2025. – Vol. 16, No. 4. – P. 441–449. – DOI: 10.17586/2220-8054-2025-16-4-441-449.
40. Голубок А.О., Левичев В.В., Пинаев А.Л., Стовпяга А.В. Исследование пьезорезонансного датчика локального силового взаимодействия сканирующего зондового микроскопа с зондом в виде микропипетки // Научное приборостроение. – 2009. – Т. 19, № 4. – С. 5–9.
41. Kim J., Kim S.-O., Cho N.-J. Alternative configuration scheme for signal amplification with scanning ion conductance microscopy // Review of Scientific Instruments. – 2015. – Vol. 86, No. 2. – Art. no. 023706. – DOI: 10.1063/1.4907360.
42. Zhuang J., Jiao Y., Li Z., et al. A continuous control mode with improved imaging rate for scanning ion conductance microscope (SICM) // Ultramicroscopy. – 2018. – Vol. 190. – P. 66–76. – DOI: 10.1016/j.ultramic.2018.04.009.
43. Radmacher M., Cleveland J.P., Fritz M., et al. Mapping Interaction Forces with the Atomic Force Microscope // Biophysical Journal. – 1994. – Vol. 66, No. 6. – P. 2159–2165. – DOI: 10.1016/S0006-3495(94)81011-0.
44. Young T.J., Monclus M.A., Burnett T.L., et al. The use of the PeakForce™ quantitative nanomechanical mapping AFM-based method for high-resolution Young's modulus measurement of polymers // Measurement Science and Technology. – 2011. – Vol. 22, No. 12. – Art. no. 125703. – DOI: 10.1088/0957-0233/22/12/125703.
45. Анкудинов А.В., Халисов М.М., Пенниайнен В.А., Подзорова С.А., Крылов Б.В. Применение атомно-силовой микроскопии для исследования процессов внутриклеточной сигнализации в нейронах // Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41, № 7. – С. 14–20.
46. Khalisov M.M., Ankudinov A.V., Penniyaynen V.A., Dobrota D., Krylov B.V. Application of atomic force microscopy for investigation of Na+,K+-ATPase signal-transducing function // Acta Physiologica Hungarica. – 2015. – Vol. 102, No. 2. – P. 125–131. – DOI: 10.1556/036.102.2015.2.2.
47. Novak P., Li C., Shevchuk A.I., et al. Nanoscale live-cell imaging using hopping probe ion conductance microscopy // Nature Methods. – 2009. – Vol. 6, No. 4. – P. 279–281. – DOI: 10.1038/nmeth.1306.
48. Velez-Ortega A.C., Belov O., Novak P., et al. Adaptive Hopping Probe Ion Conductance Microscopy of Live Cells at ∼5-10 NM Resolution // Biophysical

Journal. – 2016. – Vol. 110, No. 3, Suppl. 1. – P. 488a. – DOI: 10.1016/j.bpj.2015.11.2611.
49. Curie J., Curie P. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémièdres à faces inclinées // Bulletin de la Société minéralogique de France. 1880. Vol. 3, No. 4. P. 90–93. DOI: 10.3406/bulmi.1880.1564.
50. Lippmann G. Principe de la conservation de l'électricité, ou second principe de la théorie des phénomènes électriques // Journal de Physique Théorique et Appliquée. 1881. Vol. 10. P. 381–394. DOI: 10.1051/jphystap:0188100100038100.
51. Voigt W. Lehrbuch der Kristallphysik (mit Ausschluss der Kristalloptik). Leipzig: B. G. Teubner, 1910. DOI цифрового переиздания: DOI: 10.1007/978-3-663-15884-4.
52. Butterworth S. On Electrically-Maintained Vibrations // Proceedings of the Physical Society of London. 1914. Vol. 27, No. 1. P. 410–424. DOI: 10.1088/1478-7814/27/1/330.
53. Cady W. G. The Piezo-Electric Resonator // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. 1922. Vol. 10, No. 2. P. 83–114. DOI: 10.1109/JRPROC.1922.219800.
54. Pierce G. W. Piezoelectric Crystal Resonators and Crystal Oscillators Applied to the Precision Calibration of Wavemeters // Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences. 1923. Vol. 59, No. 4. P. 81–106. DOI: 10.2307/20026061.
55. Giebe E., Scheibe A. Sichtbarmachung von hochfrequenten Longitudinalschwingungen piezoelektrischer Kristallstäbe // Zeitschrift für Physik. 1925. Vol. 33. P. 335–344. DOI: 10.1007/BF01328318.
56. Max von Laue M. Piezoelektrisch erzwungene Schwingungen von Quarzstäben // Zeitschrift für Physik. 1925. Vol. 34. P. 347–361. DOI: 10.1007/BF01328481.
57. Dye D. W. The Piezo-Electric Quartz Resonator and Its Equivalent Electrical Circuit // Proceedings of the Physical Society of London. 1926. Vol. 38, No. 1. P. 399–457. DOI: 10.1088/1478-7814/38/1/344.
58. Van Dyke K. S. The Piezo-Electric Resonator and Its Equivalent Network // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. 1928. Vol. 16, No. 6. P. 742–764. DOI: 10.1109/JRPROC.1928.221466.
59. Liu P., Wen Z., Sun L. An In-Pipe Micro Robot Actuated by Piezoelectric Bimorphs // Chinese Science Bulletin. – 2009. – Vol. 54, No. 12. – P. 2134–2142. – DOI: 10.1007/s11434-009-0222-x.
60. Spanner K., Koc B. Piezoelectric Motors, an Overview // Actuators. 2016. Vol. 5, № 1. P. 6. DOI: 10.3390/act5010006
61. Spanner K., Koc B. Piezoelectric Motors, an Overview // Actuators. — 2016. — Vol. 5, № 1. — P. 6. — DOI: 10.3390/act5010006
62. Tian X., Liu Y., Deng J., Wang L., Chen W. A review on piezoelectric ultrasonic motors for the past decade: Classification, operating principle, performance, and future work perspectives // Sensors and Actuators A: Physical. — 2020. — Vol. 306. — P. 111971. — DOI: 10.1016/j.sna.2020.111971

63. Shafik A., Ben Mrad R. Piezoelectric Motor Technology: A Review // Nanopositioning Technologies: Fundamentals and Applications / Ed. by C. Ru, X. Liu, Y. Sun. — Cham: Springer, 2016. — P. 33–59. — DOI: 10.1007/978-3-319-23853-1_2
64. Li J., Huang H., Morita T. Stepping Piezoelectric Actuators with Large Working Stroke for Nano-positioning Systems: A Review // Sensors and Actuators A: Physical. — 2019. — Vol. 292. — P. 39–51. — DOI: 10.1016/j.sna.2019.04.006
65. Okamoto Y., Yoshida Y. Development of linear actuators using piezoelectric elements // Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science). – 1998. – Vol. 81, No. 11. – P. 11–17. – DOI: 10.1002/(SICI)1520-6440(199811)81:11<11::AID-ECJC2>3.0.CO;2-6.
66. Drevniok B., Paul W.M., Hairsine K.R., McLean A.B. Methods and instrumentation for piezoelectric motors // Review of Scientific Instruments. – 2012. – Vol. 83, No. 6. – Art. no. 065102. – DOI: 10.1063/1.4724297.
67. Watanabe S., Kitazawa S., Sun L., et al. Development of high-speed ion conductance microscopy // Review of Scientific Instruments. – 2019. – Vol. 90, No. 12. – Art. no. 123701. – DOI: 10.1063/1.5118360.
68. Gorbenko O.M., Lukashenko S.Y., Pichakhchi S.V., et al. Inertial nanostep piezoelectric drive: modeling and experiment // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2024. – Vol. 15, No. 5. – P. 643–653. – DOI: 10.17586/2220-8054-2024-15-5-643-653.
69. Шелковников Е.Ю., Горячев В.П., Тоболкин А.В., и др. Особенности изготовления СТМ-зондов для исследований нанообъектов при быстрых режимах сканирования // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19, № 4. – С. 552–559.
70. Pellegrino M., Orsini P., Pellegrini M., et al. Measuring the Elastic Properties of Living Cells through the Analysis of Current–Displacement Curves in Scanning Ion Conductance Microscopy // Pflügers Archiv – European Journal of Physiology. – 2012. – Vol. 464, No. 3. – P. 307–316. – DOI: 10.1007/s00424-012-1132-2.
71. Rheinlaender J., Schäffer T.E. Mapping the Mechanical Stiffness of Live Cells with the Scanning Ion Conductance Microscope // Soft Matter. – 2013. – Vol. 9, No. 12. – P. 3230–3236. – DOI: 10.1039/C2SM27412D.
72. Clarke R.W., Novak P., Zhukov A., et al. Low Stress Ion Conductance Microscopy of Sub-Cellular Stiffness // Soft Matter. – 2016. – Vol. 12, No. 35. – P. 7378–7385. – DOI: 10.1039/C6SM01106C.
73. Page A., Perry D., Unwin P.R. Multifunctional scanning ion conductance microscopy // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2017. – Vol. 473, No. 2201. – Art. no. 20160889. – DOI: 10.1098/rspa.2016.0889.
74. Perry D., Momotenko D., Lazenby R.A., et al. Simultaneous Nanoscale Surface Charge and Topographical Mapping // ACS Nano. – 2015. – Vol. 9, No. 7. – P. 7266–7276. – DOI: 10.1021/acsnano.5b02091.

75. Clarke R.W., Zhukov A., Richards O., et al. Pipette–Surface Interaction: Current Enhancement and Intrinsic Force // Journal of the American Chemical Society. – 2013. – Vol. 135, No. 8. – P. 3222–3227. – DOI: 10.1021/ja3108423.
76. Zhu C., Huang K., Siepser N.P., Baker L.A. Scanning Ion Conductance Microscopy // Chemical Reviews. – 2021. – Vol. 121, No. 19. – P. 11726–11768. – DOI: 10.1021/acs.chemrev.0c00962.
77. Ushiki T., Ishizaki K., Mizutani Y., et al. Scanning Ion Conductance Microscopy of Isolated Metaphase Chromosomes in a Liquid Environment // Chromosome Research. – 2021. – Vol. 29, No. 1. – P. 95–106. – DOI: 10.1007/s10577-021-09652-7. *(Примечание: авторы уточнены по файлу)*.
78. Lukashenko S.Yu., Gorbenko O.M., Felshtyn M.L., et al. Effect of Nanoscale Water Media Confinement on the Approach Curve in SICM // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2025. – Vol. 16, No. 6. – P. 770–777. – DOI: 10.17586/2220-8054-2025-16-6-770-777.
79. Инерционный двигатель : пат. 2297072 Рос. Федерация : МПК H01J 37/28, G01B 11/08, H01L 41/09 / Быков В.А., Голубок А.О., Котов В.В., Сапожников И.Д. ; заявитель и патентообладатель ЗАО «Нанотехнология-МДТ». — № 2005134280/28 ; заявл. 08.11.2005 ; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10. — 7 с. : ил.
80. Wang H., Zhang Q. M., Cross L. E., Trottier C. M. Tailoring Material Properties by Structure Design — Radially Poled Piezoelectric Cylindrical Tube // Ferroelectrics. — 1995. — Vol. 173, No. 1. — P. 181–189. — DOI: 10.1080/00150199508236033
81. Юревич Е.И. Теория автоматического управления : учебник для студентов высших учебных заведений по направлению подготовки "Системный анализ и управление". – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.
82. Пичахчи С.В., Горбенко О.М., Лукашенко С.Ю., и др. Уменьшение времени получения изображения в сканирующем микроскопе ионных токов в "hopping"-моде // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50, № 20. – С. 48–51. – DOI: 10.61011/PJTF.2024.20.58988.19957.
83. Жуков М.В., Лукашенко С.Ю., Сапожников И.Д., и др. Многомодовый сканирующий микроскоп ионной проводимости с системой пьезоинерциального перемещения // Научное приборостроение. – 2022. – Т. 32, № 4. – С. 68–87. – DOI: 10.18358/np-32-4-i6887.


R1
1G
U1
IN-
IN+
V-
V+
OUT
12V
-12V
AD795
TP1
Вход
TP2
Выход
R2
200
R3
51k
TP3
"0"
TP4
U
GND
U2
AD8531
TP7
Экр.
TP5
12V
TP6
GND
C1
47n
R4
910
TP8
Инд.
R5
100
TP9
-12V
C2
47n
Title
Size
A4
Number
Revision
Date:
12.01.2025
Sheet of
File:
C:\Users\..\Sheet1.SchDoc
Drawn By:


GND
C1 0.1u
R5 10
-12V
TP1 -12V
X2
1
2
3
3 pin
XH2.54-3
GND
GND
TP3 GND
R9 10
12V
TP5 12V
C3 0.1u
GND
R1 50k
-12V
12V
TP2 "0"
R2 50k
-12V
12V
R6 10k
R10 200k
C4 0.1u
GND
R3 20k
R4 10k
R7 3.9k
R8 2k
J1
1a 1b
2a 2b
3a 3b
4a 4b
DIP_Switch_4pin
GND
X1
Out
GNDA
Sig
TP4
Выход
Выход
R11 16k
C2
In
GND
TP6
TP7
Вход
Вход
R12 5k
R14 2k
GND
U1
OUT1
-IN1
+IN1
V-
V+
OUT2
-IN2
+IN2
AD8676
12V
-12V
R13 51
Out
J2
1a 1b
2a 2b
3a 3b
DIP_Switch_3pin
C5 33n
C6 0.01u
C7 2.2n
C8 47n
R16 50k
R15 2k
TP8
U
R17 51
TP9
U*10
C9 22p
R22 10k
R19 10k
R23 100k
R21 39k
R24 20k
TP10
U_вход
X3
GNDA
Sig
U
GND
J3
1a 1b
2a 2b
3a 3b
4a 4b
DIP_Switch_4pin
R18 5.1k
R20 1.5k
R25 510
R26 220
U2
OUT1
-IN1
+IN1
V-
V+
OUT2
-IN2
+IN2
AD8676
12V
-12V
GND
R27 1M
R28 100k
R29 100
R30 50k
-12V
12V
GND
12V
-12V
C10 0.1u
C11 0.1u
C12 0.1u
C13 0.1u
GND
Title
Size
A4
Number
Revision
Date: 12.01.2025
Sheet of
File: C:\Users\..\Sheet1.SchDoc
Drawn By: