Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования
«Международный институт компьютерных технологий»

На правах рукописи

БЕЛОУСОВА ОЛЕСЯ ВЛАДИМИРОВНА

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент,

Анненков Андрей Николаевич

Воронеж - 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..... 4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ…..……. 12
1.1. Анализ технологии фотолитографии…… 12
1.2. Фоторезисты для процесса фотолитографии…… 17
1.3. Генезис технологий и оборудования фотолитографии…… 20
1.4. Этапы развития кластерных комплексов фотолитографии…… 29
1.5. Описание конструкции отдельных модулей и блоков, входящих в состав кластерных комплексов…… 40
1.6. Технологический процесс нанесения фоторезиста и его параметры … 42
1.7. Выводы по главе 1…… 45
ГЛАВА 2. КОНСТРУКЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ НАНЕСЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА……. 47
2.1. Параметры, влияющие на технологический процесс нанесения фоторезиста и практические рекомендации по проектированию…… 47
2.2. Разработка базового технологического процесса на автоматизированной установке нанесения фоторезиста…… 53
2.3. Общая компоновка и технические характеристики автоматизированной установки нанесения фоторезиста…… 57
2.4. Особенности конструкций модулей установки…… 62
2.5. Выводы по главе 2…….. 76
ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЦЕНТРИФУГИ……...…….. 78
3.1. Методика алгоритма построения быстродействующего микропроцессорного регулятора системы автоматического управления центрифуги…….. 78
3.2. Выбор серводвигателя, аналогов электропривода центрифуги и

современных методов управления с целью обеспечения требуемых динамических и ресурсных свойств …….. 98
3.3. Моделирование динамических режимов работы центрифуги…….. 103
3.4. Выводы по главе 3…… 119
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ НАНЕСЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА……...…… 121
4.1. Особенности микропроцессорного обеспечения в рамках отечественной практики……. 121
4.2. Описание аппаратной части системы управления и настройка системы стабилизации температурных параметров……. 125
4.3. Структуры программного обеспечения и алгоритмы программного управления модулями установки……..… 132
4.4. Структура библиотеки технологических программ, пользовательский интерфейс и блокировки……. 156
4.5. Структура программы управления автоматизированной установкой нанесения фоторезиста…….. 162
4.6. Выводы по главе 4……. …….. 167
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…… 169
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ……. 171
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……...…… 174
Приложение А…… 192
Приложение Б…… 193
Приложение В…… 194

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Российские производители электронной комплектующей базы на сегодняшний день проявляют повышенный интерес к технологическому перевооружению своего производства для работы на подложках диаметром 150 и 200 мм с критическими размерами 180 и 350 нм. Отечественные предприятия, занимающие лидирующие позиции на нашем рынке микроэлектроники, на данный момент используют уровень технологии (90 ÷ 65) нм. Сегодня на российском рынке не заявлено российское оборудование для фотолитографии, соответствующее мировому уровню технологий, а универсальные процессоры Эльбрус-8С, Эльбрус-16С и конкурирующий с ними Байкал-Т, разработанные под нормы 28 нм, заказанные в Республике Корея (компания TSMC), подверглись санкциям.

Основной проблемой при формировании плёнки фоторезиста толщиной (65÷28) нм является обеспечение её равномерности и точности стабилизации температурных параметров рабочих поверхностей технологических модулей и самого фоторезиста при включенном фильтровентиляционным блоке.

Поэтому в настоящее время для удовлетворения спроса потребителей является актуальной задача по созданию установки с применением моделирования системы управления технологическим процессом нанесения фоторезиста, обеспечивающего технологические нормы (90 ÷ 28) нм; актуальна задача создания комплекса алгоритмов работы модулей оборудования и установки в целом и разработки пакета программного обеспечения для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста.

Диссертационная работа выполнялась в рамках одного из приоритетных научных направлений Программы фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период (2021÷2030 годы), принятой постановлением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р и утверждённой председателем

правительства РФ М.В. Мишустиным по направлению фундаментальных и поисковых научных исследований 2.2.1. Автоматизированные системы управления (2.2.1.3. Робототехника и автоматическое управление).

Степень разработанности темы исследования. Технологические лидеры в мире, такие как Intel и Samsung, которые имеют собственное производство процессоров по топологическим нормам 7 нм и меньше, вынуждены бороться за своё место на рынке в условиях жёсткой конкуренции. Большинство других компаний, даже такие известные, как Apple и AMD, давно используют фаблесс-режим (отправляют заказы на изготовление своих новых процессоров специализированным производителям). Сегодня это TSMC, Тайвань, которая тесно работает с международной компанией ASML, Нидерланды, выпускающей основное технологическое оборудование. На фабрике TSMC в настоящее время освоено серийное производство сверхбольших интегральных микросхем по технологическим нормам 5 нм, а опытные образцы можно делать уже по технологическим нормам 3 нм.

Подобное оборудование как до, так и после введения санкций, в Россию никогда не поставлялось. В РФ помимо универсального процессора Эльбрус-8С, Эльбрус-16С и конкурирующего с ними универсального процессора Байкал-Т, разработанных под нормы 28 нм, а так же процессора Байкал – S, представляющего собой 48-ядерный процессор спроектированный по 16 нм технологическому процессу, анонсирована разработка универсального процессора на третьей архитектуре набора команд RISC-V. Партии процессоров для всех были заказаны на TSMC, которая в настоящее время также объявила о санкциях.

В целом нанесение фоторезистов методом центрифугирования достаточно хорошо описано в трудах Я.А. Федотова, В.В. Волцита, И. Н. Рубцова, И. Шиллинга, Г. Поля, А.В. Субашиева, В.И. Переля, В.Д. Вернера, В.Г. Шинкаревского, Б.А. Лапшинова, К.А. Валиева, В.К. Попова, С.Н. Ячменева, К. Кохи, Т. Ринке. Тем не менее, особенности, накладываемые необходимостью

формирования плёнок толщиной порядка (10÷90) нм, предъявляют свои требования к закону изменения скорости в процессе разгона центрифуги и становятся центральным вопросом технологии их нанесения. Научные публикации на эту тему практически отсутствуют.

Тем не менее, в России имеются запатентованные разработки, которые можно использовать в безмасочной рентгеновской литографии, к тому же такая технология способствует выпуску небольших серий процессоров по приемлемой себестоимости. В развитии российского оборудования неизбежным становится переход от автоматизированных линий фотолитографии на трековой платформе к комплексам оборудования на кластерной платформе, что полностью отвечает современным мировым концепциям построения оборудования рассматриваемого класса. На сегодняшний момент отсутствует отечественное оборудования для фотолитографии на российском рынке, которое имело бы соответствие мировому уровню.

Объект исследования – автоматизированная система управления технологическим процессом нанесения фоторезиста и оборудованием для его реализации.

Предмет исследования – модели, методики, алгоритмы и программное обеспечение для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом нанесения фоторезиста для обеспечения выпуска продукции микроэлектроники с высоким качеством наносимого фоторезиста за счёт уменьшения толщины и повышения равномерности наносимого слоя, а также точности стабилизации температурных параметров технологических модулей и сред.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Выполнить анализ развития технологии и оборудования фотолитографии, определить технологические режимы для формирования слоёв фоторезиста в интервале (10÷90) нм.

2. Разработать модель системы автоматического управления процессом нанесения фоторезиста для повышения качества нанесения тонких слоёв фоторезиста.

3. Разработать методику формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающего линейный рост её скорости.

4. Разработать динамическую модель автоматической системы управления скоростью вращения центрифуги и провести моделирование динамических режимов её работы.

5. Разработать алгоритмы управления отдельными модулями оборудования и комплексный алгоритм автоматизированной установки нанесения фоторезиста, а также создать пакет программного обеспечения для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста.

Научная новизна. Получены следующие научные результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Разработана новая модель системы автоматического управления процессом нанесения фоторезиста, отличающаяся наличием обратной связи по скорости вращения центрифуги, а так же обратными связями по температурным параметрам модулей контроля подогрева фоторезиста, термообработки и термостабилизации, определяющих температурные параметры рабочих поверхностей и сред, с целью обеспечения требуемой толщины пленки и её целостности.

2. Создана новая методика формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающего линейный рост её скорости, что позволяет достичь требуемую равномерность плёнки фоторезиста.

3. Разработана новая модель системы автоматического управления центрифуги, отличающейся наличием обратной связи по скорости, обеспечивающей постоянство ускорения за счёт регулирования угла нагрузки путём опережения включения токов в статорной обмотке бесконтактного

двигателя, то есть получение требуемых толщины и равномерности плёнки фоторезиста.

4. Созданы алгоритмы автоматизированной системы управления установкой нанесения фоторезиста и её функциональных модулей, имеющих отличительную черту в виде разработанных разрядных сеток обработки команд управления и сигналов с датчиков температуры и скорости вращения, обеспечивающие уменьшение толщину пленки фоторезиста в интервале (10÷90) нм.

Теоретическая значимость исследования. Теоретическая значимость определяется новыми функциональными связями динамической модели автоматической системы управления, а также модулей стабилизации её температурных параметров, новой моделью динамического расчета электропривода центрифуги, отличающейся наличием обратной связи по скорости и функционально определяющей постоянство ускорения за счёт регулирования угла нагрузки путём опережения включения токов в статорной обмотке, при помощи которой выполнен расчёт режимов работы автоматической системы управления, определяющих толщину и равномерность нанесения плёнки фоторезиста, являющиеся важнейшими технологическими параметрами, а также алгоритмами управления отдельными модулями оборудования и комплексным алгоритмом автоматизированной установки нанесения фоторезиста.

Практическая значимость исследования. Практическая значимость заключается в следующем:

- разработана библиотека технологических программ, в которую включены наборы макросов, позволяющих обеспечить автоматическую обработку подложек с заданными характеристиками, а также процедуры записи макросов в двух режимах: в режиме выполнения диагностических команд и в автономном режиме, который представлен в форме табличного задания;

- опираясь на многолетний опыт по разработке, обслуживанию, использованию, ремонту автоматизированных установок нанесения фоторезиста

приведены рекомендации, которые подробно описывают все нюансы при разработке подобного оборудования;

- разработан узел создания вакуума для удержания обрабатываемой пластины на вращающемся роторе центрифуги, отличающейся конструктивным расположением, формой и материалом вакуумного уплотнения.

Методы исследования. При решении поставленных задач в диссертационной работе использовались такие методы, какметод Циглера – Никольса, метод прямого и обратного преобразования Лапласа, эвристический метод, а так же метод наименьших квадратов при линейной регрессии, используемый при аппроксимации. При решении вычислительных задач использовалось ПО C++ и STEP7, а также пакеты программ Matlab, КОМПАС. Испытания проводились на модификациях установок нанесения фоторезиста, разработанных в рамках НИОКР с 2011 г. по 2021 г.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается выбором апробированных методов анализа, результатами численного моделирования и их совпадением с результатами испытаний, а также обслуживания широкого ряда конструктивных исполнений данного вида автоматизированных установок, подкрепляется фундаментальными достижениями технологических лидеров в области фотолитографии, отражёнными в обзоре научной литературы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель системы управления для автоматизации технологического процесса нанесения фоторезиста

2. Общая компоновка и технические характеристики автоматизированной установки нанесения фоторезиста.

3. Методика формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающего работу привода с постоянным ускорением и поддержание установившейся скорости вращения.

4. Модель системы автоматического управления центрифуги, отличающейся наличием обратной связи по скорости, обеспечивающей постоянство ускорения.

5. Результаты моделирования, показывающие количественную зависимость параметров переходных процессов от угла нагрузки.

6. Алгоритмы управления отдельными модулями оборудования и комплексный алгоритм автоматизированной установки нанесения фоторезиста.

7. Программного обеспечения для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика и электротехника» (2017 - 2019), Международная научно-техническая конференция «Энергетика XXI: проблемы, технологии, инновации» (2022).

Реализация и внедрение результатов исследования. Созданные различных модификаций автоматизированные установки нанесения фоторезиста были поставлены для ряда ведущих предприятий РФ: ОАО «ЛЭМЗ» (Лианозовские радары) г. Москва; Ордена Трудового Красного Знамени «Институт химии силикатов» имени И.В. Гребенщикова», г. Санкт-Петербург; АО «Государственный оптический институт» им. Вавилова», г. Санкт-Петербург.

Теоретические результаты диссертационной работы используются в учебном процессе АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий. Разработанный программный комплекс апробирован в Международном институте компьютерных технологий. Эффект от внедрения заключается в обеспечении требуемых технологических параметров и повышении эффективности управления разработанным оборудованием.

Публикации. Всего опубликовано 17 научных работ, из них по теме диссертационной работы опубликовано 15 работ, в том числе: 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 4 работы в материалах международных и

всероссийских конференций, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент Российской Федерации на полезную модель.

В работах, опубликованных в соавторстве и приведённых в конце автореферата, лично соискателю принадлежат следующие результаты: [1, 3, 7, 10] – разработка модели системы автоматического управления процессом нанесения фоторезиста, [4, 5, 6, 11 - 15] – создание методики формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, [9] – разработка модели автоматической системы управления центрифуги, [2, 8] – разработка алгоритмов управления отдельными модулями оборудования и комплексного алгоритма автоматизированной установки нанесения фоторезиста.

Исследование соответствует паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, п.1 «Автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки», п. 5 «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами», п. 12 «Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени», п. 16 «Средства и методы проектирования и разработки технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ».

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение и содержит 191 страницу основного машинописного текста, 88 рисунков, 21 таблицу, список литературы из 151 наименований и три приложения. Общий объем диссертационной работы составляет 194 страницы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

1.1. Анализ технологии фотолитографии

Универсальным параметром, характеризующим качество фотолитографического процесса, является его технологическая норма, то есть расстояние между отдельными элементами топологической маски, которая от субмикронных размеров изменилась до нанометровых, и сегодня для отечественной микроэлектроники лежит в интервале (90÷28) нм. С точки зрения параметров технологического процесса нанесения фоторезиста это означает, что толщина формируемого слоя составляет те же величины, иначе говоря плёнки фоторезиста примерно равна технологической норме. В зарубежной литературе технологическая норма получила название топологический параметр, или Critical Dimension (CD). Развитие технологии фотолитографии и её оборудования определяют технологический и технический прогресс в важнейших производствах микроэлектроники и радиоэлектроники [33, 82], а в последние годы и оптике, на поверхности линз которых создаются топологические слои для создания лимбов, шкал и т.п.

Фотолитография основана на применении фоторезистов (далее резистов), чувствительных к потоку излучения, которые способны переходить в устойчивое состояние к травителям (негативные) или разрушаться (позитивные) [20]. Разрешающая способность определяется минимально возможным расстоянием между элементами топологии и зависит от длины волны излучения.

Главным преимуществом фотолитографии является возможность одновременного переноса изображения. Это и является основой высокой интеграции [55, 60] (рисунок 1.1, таблица 1.1).

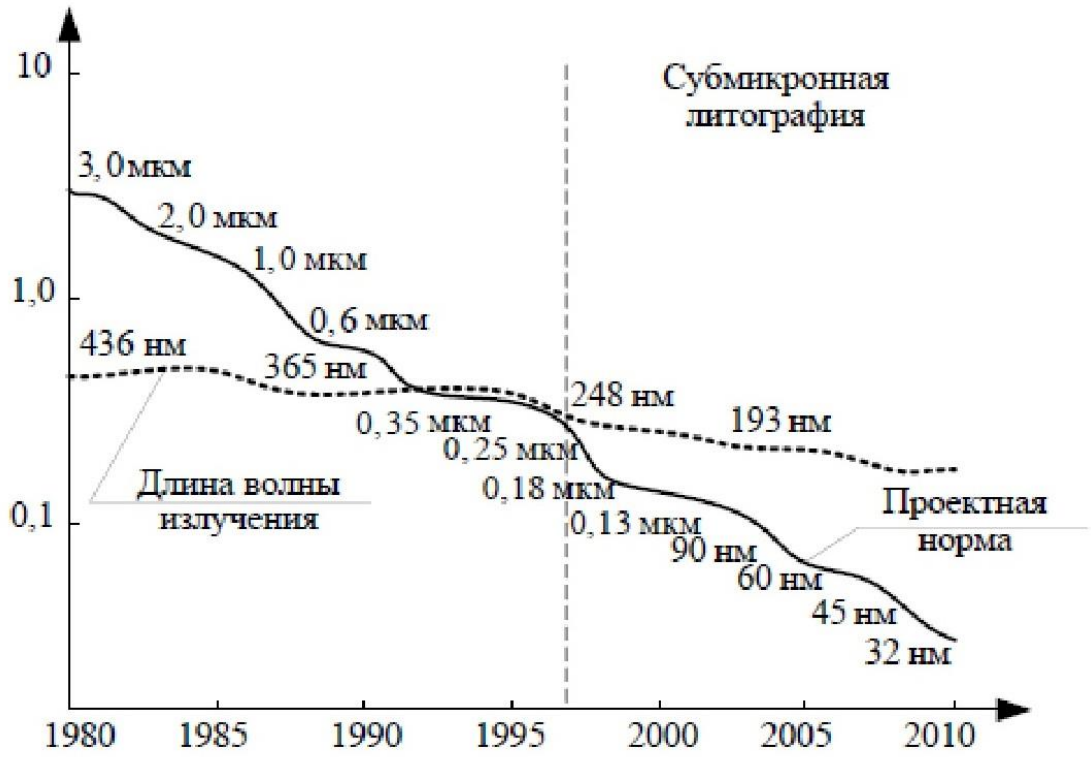


Рисунок 1.1 – Динамика развития литографического процесса в микроэлектронике

Таблица 1.1–Проектные нормы элементов микросхем для различных уровней технологии

Уровень технологии (топологическая норма), нм	**Затворы**		**Контакты**		**Алюминиевая и медная металлизация**	
	Размер, d нм	**Зазор, Lнм**	**d, нм**	**L, нм**	**d, нм**	**L, нм**
500	500	600	550	750	600	700
350	350	450	400	550	500	600
250	250	360	300	400	400	500
180	180	280	220	300	300	400
130	130	200	160	220	220	280
90	90	130	110	150	150	200
65	65	90	80	110	110	150
45	45	65	55	75	75	100

Минимальное разрешение в фотолитографии является функцией длины волны экспонирующего ультрафиолетового (УФ) света и числовой апертуры фокусирующей системы [39, 40, 116].

В соответствие с критерием Релея предельное разрешение оптической системы определяется выражением (1.1):

$$R = k_1 \cdot \lambda / N.A. \quad (1.1)$$

где R – разрешение;

k_1– константа;

λ – длина волны света;

N.A.- числовая апертура объектива, которая рассчитывается по формуле (1.3).

При этом глубина фокуса D.F. вычисляется по формуле (1.2):

$$DF = k_2 \cdot \lambda / N.A.^2, \quad (1.2)$$

где k_2 – константа;

λ – длина волны света;

N.A.- числовая апертура объектива, которая рассчитывается по формуле (1.3):

$$N.A. = n \cdot \sin \theta; \quad (1.3)$$

где n - показатель преломления среды: для воздуха 1,00, для чистой воды 1,33, для иммерсионного масла 1,52;

θ - максимальный полуугол конуса света, входящий или выходящий из линзы.

Таким образом, размеры элементов можно уменьшить как путем уменьшения длины волны, так и посредством увеличения числовой апертуры объектива. Однако увеличение числовой апертуры уменьшает глубину фокуса объектива в квадратичной зависимости. С теоретической точки зрения, в связи с дифракцией потока фотонов, разрешающая способность не может превышать половины длины волны экспонирующего излучения. Практика это подтверждает.

По этой причине доминирующим подходом в фотолитографии за прошедшие более 50 лет являлось уменьшение длины волны света [37, 116]:

- длина волны ртутной лампы 436 нм, числовая апертура 0,35, разрешение фоторезиста 1 мкм, уровень интеграции микросхем 1 Mb;

- длина волны ртутной лампы 365 нм, числовая апертура 0,35, разрешение фоторезиста 0,6 ÷ 0,7 мкм, уровень интеграции микросхем 4 Mb (это произошло в 1992 г. благодаря использованию излучения ртутных ламп высокого давления);

- длина волны ртутной лампы 365 нм, числовая апертура 0,5 ÷ 0,6, разрешение фоторезиста 0,4 ÷ 0,5 мкм, уровень интеграции микросхем 16 Mb;

- дальний ультрафиолет - длина волны эксимерного лазера KrF 248 нм, числовая апертура 0,6 - разрешение фоторезиста 0,25 мкм, уровень интеграции микросхем 64 Mb (благодаря использованию эксимерных лазеров на газовой смеси KrF[36]);

- дальний ультрафиолет - длина волны эксимерного лазера ArF 193 нм, числовая апертура 0,6. Разрешение фоторезиста 0,13 мкм, уровень интеграции микросхем 256Mb;

- дальний ультрафиолет - длина волны эксимерного лазера ArF 157 нм, числовая апертура 0,6: разрешение фоторезиста 0,09 мкм, уровень интеграции до микросхем 1Gb; возможности этой литографии были ограничены технологией 32нм.

Из приведённого выше хорошо видно, что по мере уменьшения длины волны используемого излучения разрешение литографического процесса увеличивается.

В целом, переход фотолитографии кнанотехнологическому рубежу (<100нм) выявил две существенные проблемы.

Первая проблема состоит в практической невозможности осуществления токоведущей разводки в одном слое, то есть появилась необходимость создания многослойной системы межсоединений, что привело к дополнительным проблемам в ходе реализации такой фотолитографической маски.

Вторая проблема связана с изменением соотношения высоты соединения между слоями к горизонтальному размеру токоведущей разводки в пользу высоты соединения между слоями.

В РФ в субмикронных технологиях кремниевых интегральных микросхем (ИС) многослойная система металлизации применяется до топологической нормы 130нм. Начиная с этой величины в связи с необходимостью дальнейшего увеличения топологического разрешения, а также с рядом технологических проблем все более очевидной становится необходимость освоения технологий трехмерной интеграции.

При переходе к современным трехмерным технологиям - сквозные отверстия в кремнии, меза-структуры, щелевые структуры, основной конструктивной особенностью является наличие развитых трехмерных поверхностей и высокоаспектных структур. Высокая вертикальная топология подложки накладывает свой отпечаток на технологический процесс производства, поэтому на этапе нанесения фоторезиста возникают сложности, связанные с неравномерным нанесением фоторезиста на грани и боковые стенки.

Достижение предельного разрешения на каждой длине волны требовало решения сложных проблем. Переход к каждой новой длине волны (к каждой новой топологической норме) требовал разработки новых фоторезистов, удовлетворяющих определенной совокупности ключевых требований.

Равномерность распределения покрытия, высокая адгезия, уровень загрязнений – это те параметры, по которым характеризуется качество фоторезиста. Фоторезист с требуемыми параметрами и стремятся использовать на пластинах при получении ИС с элементами, размер которых меньше микрона [35, 123].

На малые элементы микросхемы, а чем они меньше, тем больше оказывает отрицательное воздействие сторонние частицы, притягивающиеся и тем самым загрязняющие поверхность пластины. Как следствие, такие скопления малейших частиц приводит к браку изделие.

Так же нужно учитывать и контроль за технологическим процессом нанесения фоторезиста, без которого нет возможности получить необходимое качество плёнок за достаточно долгий промежуток времени.

1.2. Фоторезисты для процесса фотолитографии

Фоторезисты должны удовлетворять совокупности ключевых требований [25]:

- под воздействием излучения резист должен менять гидрофобно-гидрофильные свойства так, чтобы пленка фоторезиста после экспонирования могла быть проявлена в подходящем проявителе (щелочных растворителях);

- резист должен быть прозрачен на длине волны излучения;

- резистдолжен быть устойчив к плазмохимическому травлению;

- пленка резиста должна сохранять рисунок при достаточно высоких температурах плазмохимического травления;

- резист должен иметь хорошую адгезию к различным подложкам;

- резист должен иметь разумные сроки хранения и минимальные токсикологические риски.

В настоящее время существует два успешных подхода: разработка резистов с химическим проявлением и разработка резистов с формированием изображения в тонком светочувствительном слое (технология TFI).

Выяснилось, что нафтохинондиазид-новолачные резисты не могут работать на длинах волн 248 нм и короче из-за сильного поглощения излучения резистом и его низкой фоточувствительности в этом диапазоне.

В 80-х годах прошлого века начались разработки фоторезистов с химическим усилением (ФХУ-резистов). Они были созданы специалистами IBM, когда компания осуществляла переходк стандарту CD = 250 нм. ФХУ-резисты – это новый тип резистов, в которых фотохимическая реакция не зависит только от поглощения излучения.

ФХУ резисты для 248 нм основаны на полимерах п-гидроксистирола или сополимерах с бутилакрилатом. В зависимости от назначения в резист вводятся различные светочувствительные соединения - генераторы кислот, защитные химические группы и добавки.

ФХУ резисты для 193 нм. Акриловые полимеры обеспечивают хорошее разрешение, однако их устойчивость к плазмохимическому травлению невысока. Циклоолефиновые полимеры имеют хорошую плазмохимическую резистентность, однако разрешающая способность их недостаточна.

ФХУ резисты для 157 нм. Разработка фоторезистов для этой длины волны наталкивается на серьезные проблемы, так как большинство углеводородов сильно поглощают на этой длине волны.

Наибольшее внимание привлекают ФХУ фоторезисты на основе фторированных полимеров и силоксанов, которые прозрачны на длине волны 157 нм.На рисунке 1.2 показан принцип его работы.

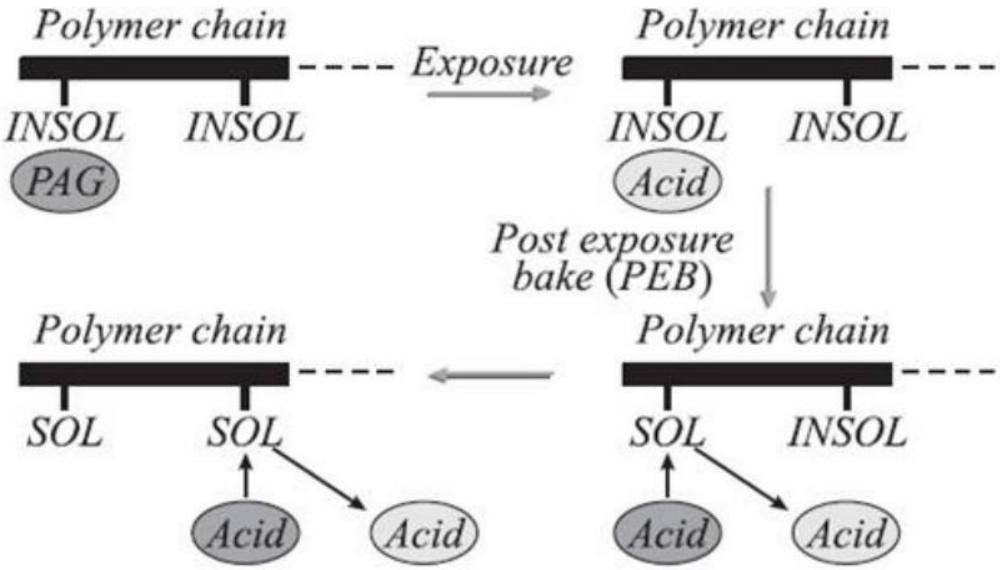


Рисунок 1.2 – Принцип работы фоторезистов с химическим усилением

Фотокислотный генератор (PhotoAcidGenerator – PAG), входящий в состав резиста, реагирует с фотоном, выделяя кислоту, которая растворяет звенья полимерной матрицы. Прореагировав со звеньями полимерной цепочки, PAG

регенерируется в постэкспозиционной термообработке 500÷1000 раз. Хотя ФХУ резисты демонстрируют высокую чувствительность, высокий контраст и высокую разрешающую способность, они имеют несколько серьезных недостатков. Одним из этих недостатков является чувствительность ФХУ резистов к щелочным загрязнениям в воздухе, иначе говоря,в связи с каталитической природой реакции существует высокая вероятность её прерывания из-за загрязнений воздушной среды между экспозицией и постэкспозиционной термообработкой.

Еще один принципиальный недостаток ФХУ-резистов начинает проявляться при их использовании для CD ниже 30 нм. В целом можно сказать, что он связан с диффузионной природой процесса и обусловлен его возможным прерыванием ввиду протяженности такой полимерной матрицы.

Поиск преодоления указанных недостатков привёл к появлению ФХУ-резистов на низкомолекулярной основе с диффузионными процессами, оптимизированными подбором PAG, величиной температуры и длительностью постэкспозиционной термообработки. В результате получены составы и технологии для работы с CD менее 20 нм, в том числе для работы в диапазоне ДУФ (CD = 11÷16 нм).

Сегодня успешно применяют двойное экспонирование и двойное создание рисунка топологического слоя, комбинирование тонких и толстых слоев фоторезиста, формирование рисунка топологического слоя в тонком светочувствительном слое (технология TFI) [25, 55, 130].Обеспечение указанных свойств стало возможным в результате разработки химически усиленных резистов, фоторезистов с химическим проявлением, а также антиотражающих покрытий[122].Таким образом, характеристики процесса фотолитографии зависят не только от оборудования, но и от физических и химических свойств фоторезистов.

1.3. Генезис технологий и оборудования фотолитографии

Для достижения требуемых проектных норм необходимо соответствовать основному критерию, который является уровнем технологии фотолитографии и оборудования для их реализации. Установки совмещения и экспонирования принято считать главным технологическим оборудованием фотолитографии. Другое технологическое оборудование значительно отличается по степени сложности, но от этого не становится менее важным. В первую очередь это установки нанесения и проявления фоторезистов; установки жидкостного химического травления и очистки; установки сухого плазмохимического травления и очистки и некоторое другое оборудование.

В СССР одной из первых, широко тиражируемых в электронной промышленности технологических линий, была линия фотолитографии «Лада-Электроника», разработанная в 1975 г. и представленная на рисунке 1.3, а позже её модификация «Лада-125»,разработанная в 1977 г. и представленная на рисунке 1.4 [99].

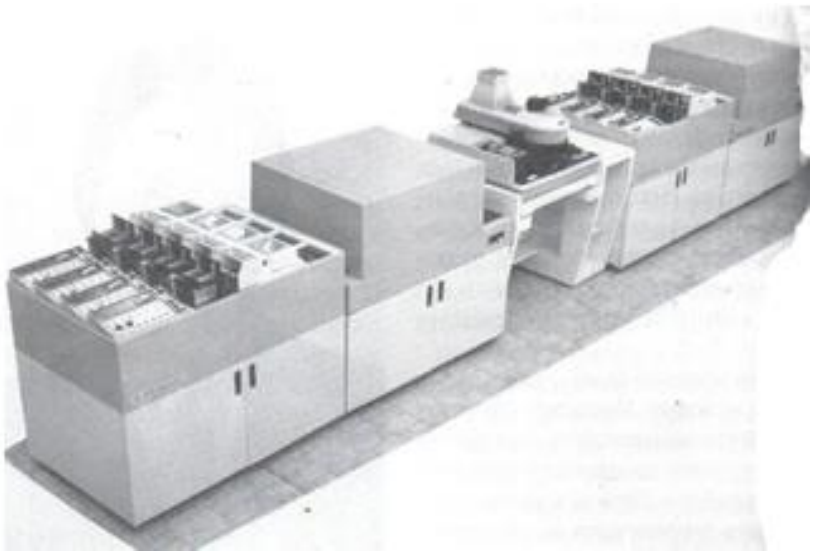


Рисунок 1.3 - Линия фотолитографии «Лада-Электроника»

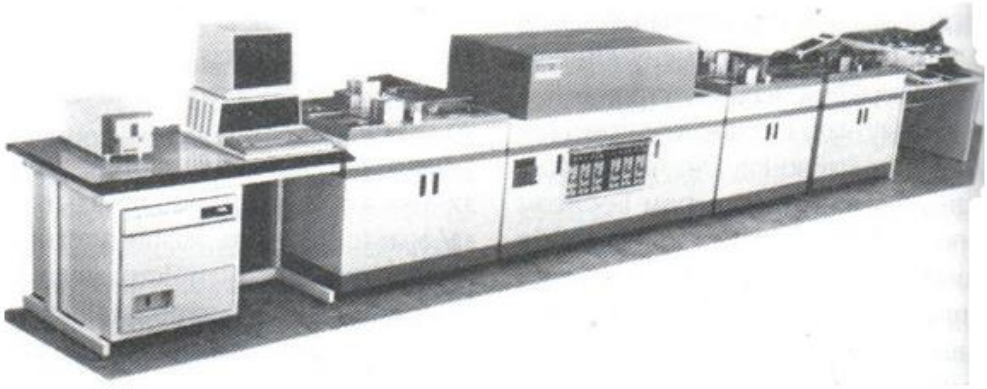


Рисунок 1.4 - Линия фотолитографии «Лада-125»

В 1983 ÷ 1985 г.г. появились линии химической обработки для фотолитографического производства «Лада-Ф», представленная на рисунке 1.5, и «Лада-1-Электроника», представленная на рисунке 1.6, позволившие поднять уровень интеграции до микросхем 1Gb[99].

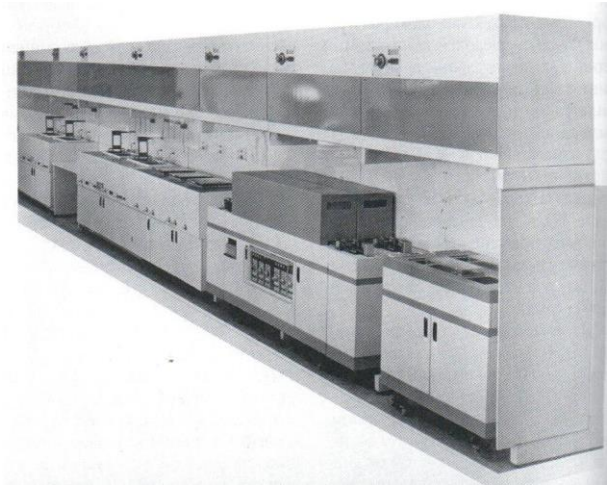


Рисунок 1.5 - «Лада-Ф»

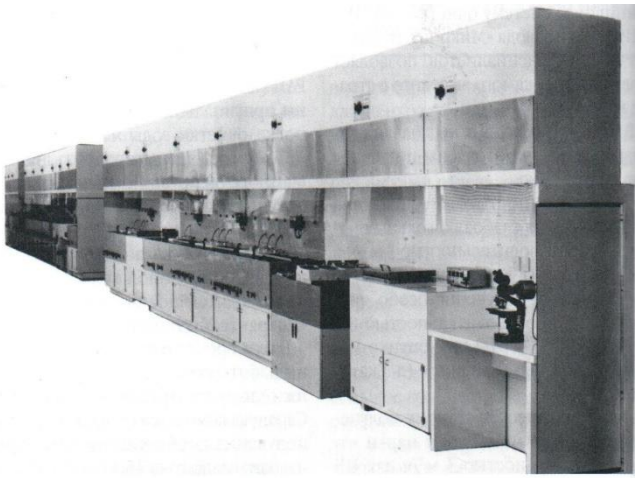


Рисунок 1.6 - «Лада-1-Электроника»

В 1985 г. была разработана новая автоматическая линия фотолитографии «Лада-150А». Внедрение линии фотолитографии «Лада-150А» в НПО «Интеграл» позволил довести уровень производства до мегабитной технологии.

В середине 90-х в короткие сроки на ОАО «НИИПМ», г. Воронеж была проведена серия модернизаций линии «Лада-150АМ», являвшейся тогда базовой

моделью. Появилась тогда новая универсальная модель – линия «Лада-150ММ», которая позволяла изготавливать треки с различным количеством технологических модулей – от 4-х до 6. Установки легко перенастраивались на обработку пластин диаметром от 76 мм до 150 мм. Линия «Лада-150АММ» обладала более высокой надёжностью и имела удобный интерфейс. Система управления треками обеспечивала многоуровневую диагностику работоспособности оборудования. В период 1994 - 1999 г. на различные предприятия в КНР было поставлено 5 модернизированных линий фотолитографии для пластин диаметром 76, 100 и 125 мм и ещё 4 линии для фотолитографической обработки пластин прямоугольной и неправильной формы[29, 30].

В начале 2000-х в ОАО «НИИПМ» появилась установка формирования резистивных пленок «УФП-100М», которая представлена на рисунке 1.7 [112].

Рисунок 1.7 - Установка формирования резистивных пленок «УФП-100М»

В ней для загрузки пластин использовалась транспортная система, автоматически переносящая их между позиций. Новым было то, что для очистки пластин использовался мегазвук, а термообработка пластин выполнялась на горячей и на холодной плите.

Российские производители электронной комплектующей базы (ЭКБ) на сегодняшний день проявляют повышенный интерес к технологическому перевооружению своего производства для работы на подложках диаметром 150 и 200 мм с критическими размерами 180 и 350 нм.

На данный момент наши отечественные предприятия, которые занимают лидирующие позиции на российском рынке микроэлектроники имеют уровень технологии 90 ÷ 65 нм. Так, на заводе «Микрон» есть полный цикл производства чипов по технологическим нормам 90 нм и неполный цикл (часть неосновного оборудования отсутствует) по технологическим нормам 65 нм.

Технологические лидеры в мире, такие как Intel и Samsung, которые имеют собственное производство процессоров по топологическим нормам 7 нм и меньше, вынуждены бороться за своё место с разработчиками чипов, и им приходиться очень непросто в этой конкуренции. Большинство других компаний, даже такие известные, как AMD и Apple, давно используют так называемый фаблесс-режим (отправляют заказы на изготовление своих новых процессоров специализированным производителям). Сегодня такой компанией является TSMC, Тайвань. Этот мировой технологический лидер тесно работает с международной компанией ASML, Нидерланды, выпускающей основное технологическое оборудование.

На фабрике TSMC в настоящее время освоено серийное производство по технологическим нормам 5 нм, а инженерные образцы можно делать уже по технологическим нормам 3 нм. В мае 2021 года IBM заявила о создании первого чипа с технологической нормой 2 нм. Подобное оборудование как до, так и после введения санкций, в Россию никогда не поставлялось и всегда было в РФ недоступным.

В РФ универсальные процессоры Эльбрус-8С, Эльбрус-16С и конкурирующий с ними универсальный процессора Байкал-Т, разработаны под нормы 28 нм. При этом партии процессоров для всех заказаны на TSMC.

Следует отметить, что компания-разработчик процессоров Эльбрус, возникшая в СССР и сохранившаяся благодаря заказам от оборонки и сотрудничеству с компанией SunMicrosystems, в дальнейшем всё-таки реализовала сама собственную разработку — процессор Эльбрус с архитектурой ядер, основанной на принципах VLIW. Некоторые второстепенные блоки этого процессора до сих пор не собственные, а купленные по лицензии, но это уже не столь критично, когда ядра свои. Процессоры Байкал, являясь российской разработкой, содержат больше лицензионных блоков, а главное — у них лицензионные ядра от компании ARM. С одной стороны, это опасность отзыва лицензии, а с другой — большее количество программного обеспечения в мире, которое совместимо с этим процессором.

Продавать в РФ конкурентоспособное оборудование для печати процессоров никто из-за рубежа не стремится. Разработать подобное оборудованием самим в разумные, короткие сроки практически невозможно, так как на данный момент имеется достаточное количество запатентованных решений, на которые придется ссылаться, и скорее всего, их тоже не продадут. К тому же рассматриваемое оборудование целесообразно использовать при выпуске больших партий процессоров, так как при выпуске малых партий процессоров их себестоимость окажется довольно высокой.

Тем не менее, в России имеются запатентованные наработки, применяющиеся в безмасочной рентгеновской литографии. Такая технология даёт возможность печатать малые серии процессоров, которые в свою очередь будут иметь приемлемую себестоимость. Если особенность такой технологии, которая заключается в том, что при сравнении с традиционной фотолитографией, для которой себестоимость одного чипа уменьшается с ростом серии, в безмасочной литографии себестоимость чипа остаётся постоянной и от объемов серии практически не зависит. Но есть и минус данной технологии – это показатель производительности, который на порядки ниже при сравнении с традиционной фотолитографией. Зато плюсов больше, одним и самых весомых является низкая

стоимость самого оборудования. Причём можно заметить, что и за рубежом не развито такое оборудование и не применяется, оно находится на стадии разработок.

Однако, следует отметить, что в РФ есть проблемы не только с финансированием в этом направлении, но с необходимыми кадрами.

В нанометровой фотолитографии серьёзным вопросом является борьба со сторонними частицами, которые могут попасть в рабочую зону технологического процесса и привести к снижению качества, а то и к браку конечный продукт. Во избежание и сокращение шансов попадания таких частиц в рабочую зону разработчики стараются объединять серии различных операций обработки и транспортировки подложек в единую кластерную систему с контролируемой газовой средой. С целью организации и управления автоматизированным кластерным производством в микроэлектронике разрабатываются специальные математические методы и модели [32, 68, 69, 71].

В развитии российского оборудования неизбежным становится переход от автоматизированных линий фотолитографии на трековой платформе к комплексам оборудования на кластерной платформе, что полностью отвечает современным мировым концепциям построения оборудования рассматриваемого класса.

Сложная последовательность операций технологического процесса занимает на производстве высокую трудоёмкость. А попытка объединить эти процессы в кластерную установку приведёт к сокращению времени обработки и к уменьшению стоимости самого производства.

Вообще в мире в области кластерного фотолитографического оборудования работают компании Tokyo Electron Limited (TEL, Япония), SUSS Micro Tec (Германия), Solar-semi (Германия), EV Group (Австрия), SCREEN Semiconductor Solutions (входит в корпорацию Dainippon Screen), TAZMO (Япония), Amcoss (Австрия), MIDASSYSTEM (Корея), Spintrac Systems, S-cube (США), имеющие собственные современные разработки [131, 132, 133,134]. Все компании,

производящие фотолитографические кластеры, можно условно разделить по уровню технологий, которые они обслуживают. Установки компаний, которые производят кластеры для работы в комплекте со степперами, обеспечивающими субмикронные (и ниже) контрольные размеры элементов рисунка, отличаются по набору элементов и параметрам от кластеров, которые используются для создания микроэлектромеханических систем (МЭМС), 3D-упаковок, экранов и т.п.

В первом случае используются более тонкие слои резиста и многослойные структуры с нанесением нескольких антиотражающих покрытий, во втором варианте необходимо наносить супертолстые слои фотополимера, клея или материала для наноимпитинга.

Ко второму типу производителей относятся чаще те, у которых есть собственное производство установок совмещения и экспонирования, например SUSS Micro Tec, EV Group, MIDAS SYSTEM, но которые не могут конкурировать с такими лидерами, как ASML, Nikon и Canon.

При переходе к современным трехмерным технологиям (сквозные отверстия в кремнии (TSV), меза-структуры, щелевые структуры) основной конструктивной особенностью является наличие развитых трехмерных поверхностей и высокоаспектных структур. Высокая вертикальная топология подложки накладывает свой отпечаток на технологический процесс производства, и на этапе нанесения фоторезиста возникают сложности, связанные с неравномерным нанесением фоторезиста (на грани и боковые стенки) [56, 57].

Реализация литографического способа, позволяющего формировать высокоаспектные резистивные маски, является достаточно сложной технологической задачей [65, 73].

Из-за разных технологических особенностей комплектация кластера может сильно отличаться. При общем рассмотрении можно выделить некоторые детали комплектации и конструктивные особенности зарубежных кластерных систем, обеспечивающих нанометровые размеры элементов топологии рисунка:

- бесконтактные электродвигатели с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов на центрифугах;

- шарнирный манипулятор (количество звеньев зависит от принятой структуры системы), с возможностью установки его на линейный привод;

- система подачи ламинарного потока фильтрованного воздуха;

- прозрачные стеклянные двери и панели, закрывающие зону обработки;

- рама и обрабатывающие блоки, выполненные в едином корпусе из нержавеющей стали.

В силу того, что современная фотолитография использует большое количество разнообразных операций, современные кластерные системы (прообразом которых были трековые установки) представляют собой многоярусные упаковки технологических блоков и несколько многофункциональных инструментов-роботов внутри единого корпуса с системой дополнительной очистки входящего потока воздуха.

Применяются две основные схемы компоновки кластерных линий фотолитографии:

- для автономной работы отдельных операций фотолитографии;

- для автоматической работы с оборудованием экспонирования (установка совмещения и экспонирования или степпер) и травления.

Суть работы кластерной линии фотолитографии заключается в том, что после выполнения ряда операций по предварительной очистке, обработке и нанесению фоторезиста, пластины загружаются в кассету и кассета с пластинами в контейнере поступает на оборудование для экспонирования. После проведения операции экспонирования, кассета с пластинами в контейнере возвращается на кластерную линию фотолитографии, где проводятся операции проявления, травления и очистки (отмывки) фоторезиста, пластины загружаются в кассету и кассета с пластинами в контейнере выходит с кластерной линии фотолитографии на дальнейшую обработку.

Фотолитографические кластеры выполняются в ряде модификаций. Во-первых, это кластеры, интегрированные с установкой совмещения и экспонирования, а во – вторых, это автономные кластеры, которые объединяют ряд технологических операций: например, операции предварительной очистки, обработки и нанесения фоторезиста; или операции проявления, травления и очистки (отмывки) фоторезиста [63].

Очевидным преимуществом автономных кластеров является отсутствие требования согласования временных периодов (тактов) выполнения операций с тактами операций совмещения и экспонирования. Это обстоятельство даёт ряд преимуществ при освоении производства многономенклатурного малосерийного производства, характерного для ряда предприятий – производителей электронной компонентной базы в РФ.

К таким преимуществам относятся гибкость производства (можно одновременно проводить аналогичные для нескольких изделий и литографий процессы, обеспечивая несколько установок экспонирования с установленными для разных литографий шаблонами); возможность отработки процессов для новых изделий; возможность введения (при необходимости) дополнительных операций (нанесение нескольких слоев фоторезиста, дополнительные термические операции, предварительное проявление без термообработки); остановка для переналадки или ремонта одной установки не повлечет за собой брака на других этапах техпроцесса; в случае необходимости возможно добавление оборудования на узких производственных местах с минимальными финансовыми издержками; быстрота и легкость перенастройки. Обработке могут быть подвергнуты подложки с произвольным размером и геометрией и из различных материалов, что позволяет применять разработанное оборудование как для малосерийного выпуска продукции, так и для новых разработок и прикладных исследований.

Современный метод 3D-сборки предполагает снижение не только проектной нормы топологии, но и толщину пластин до 15÷100 мкм [75]. Переход

к утоненным пластинам также требуется для улучшения массо-габаритных, тепловых и электрических характеристик ИС[18].

В зависимости от типа изделия пластина после утонения может проходить дополнительные операции, включая литографию с обратной стороны. Поэтому технологии транспортировки, манипулирования, перегрузки ультратонких пластин приобретают не меньшее значение, чем сам процесс формирования фоторезиста. В связи с этим разрабатываются специальные носители ультратонких пластин, которые не вызывают их разрушения и загрязнения: вакуумные схваты и даже, для определённых подложек, электростатические держатели [67].

1.4. Этапы развития кластерных комплексов фотолитографии

Оборудование на кластерной платформе, которое соответствовало бы мировому уровню, отсутствует на отечественном рынке российского оборудования для фотолитографии. На данный момент отечественные установки ориентированы для работы в мелкосерийных производствах, научно-исследовательских институтах, центрах коллективного пользования или лабораториях. Как показывает практика, они имеют на данный момент невысокие технические параметры.

Тем не менее, на российском рынке есть предприятия, имеющее опыт создания автоматизированного фотолитографического оборудования кластерной конфигурации. Например, ОАО «НИИПМ» (г. Воронеж) [99], разработавшее ещё в 2006 г. модульно-кластерный комплекс субмикронной литографии уровня 0,35 мкм, представленный на рисунке 1.8.

В 2000 году ОАО «НИИПМ» стал участником программы союзного государства Россия – Беларусь в части разработки оборудования для фотолитографического обеспечения производства СБИС с субмикронными проектными нормами. В рамках программы был разработан опытный образец

модульно – кластерного комплекса субмикронной фотолитографии для обеспечения проектных норм 0,35 мкм.

Рисунок 1.8 – Модульно-кластерный комплекс субмикронной литографии

В 2006 г. разработка кластерного комплекса была завершена. Комплекс тогда получил хорошую оценку приёмной комиссии. Он представлял собой объединение ряда технологических модулей для операции нанесения, сушки и проявления фоторезиста. Комплекс состыковывался с установкой совмещения и экспонирования, транспортировка пластин между модулями осуществлялась роботом с 6 степенями свободы производства компании Stäubli [127].

Это был первый опыт разработки подобного оборудования. Как видно на рисунке 1.8, в комплексе отсутствовал единый объём с контролируемой газовой средой, что противоречит основной идеи создания подобного оборудования.

Кроме того, в разработанном комплексе использован сравнительно высокогабаритный робот фирмы Stäubli, рабочая зона которого всё равно оказалась несколько ограничена и, следовательно, отсутствовала достаточная гибкость в условиях работы с большим количеством требуемых позиций обработки.

То есть в результате этого опыта на передний план выходят те недостатки, преодоление которых привело бы к дальнейшему уменьшению габаритов функциональных модулей для обеспечения контролируемой газовой среды и требуемого маршрута обработки и перемещения подложек в замкнутом пространстве.

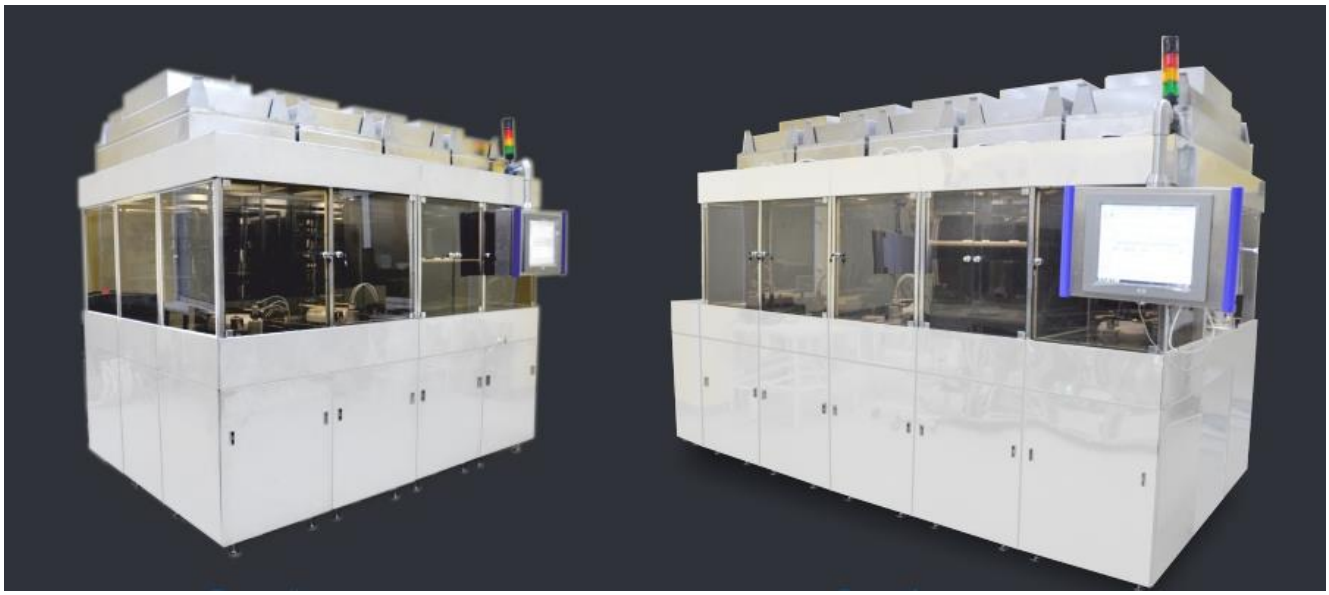
Первая отечественная автоматизированная установка нанесения фоторезиста в кластерном конструктивном исполнении с контролируемой газовой средой была разработана в конструкторском бюро технологических машин АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий» с участием автора, её опытный образец впервые был продемонстрирован на выставке 8-го межрегионального форума «Воронежская область – ваш партнёр», проходившей 15÷17 сентября 2011 г. Внешний вид этой установки и полученный на выставке диплом приведены в приложении А.

В конце 2017-го года в РФ было выделено 300 млн. рублей и Национальным исследовательским университетом МИЭТ [97] в сотрудничестве с ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводникового машиностроения» [99] и привлечением следующих соисполнителей: Институт физики микроструктур РАН [85]; АО «Завод ПРОТОН» [84]; ООО «Микрофотоника» [100]; ООО «СЕРТАЛ» [102]; АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения» [79]; ООО «Нанопромимпорт» [101] был выполнен проект по теме, направленной на разработку безмасочного литографа с разрешением выше 10 нм. Целью проекта являлась разработка иных методов, применимых к безмасочной литографии, которые могли бы выдать необходимую производительность и нанометровое пространственное разрешение. Таким образом, был предложен абсолютно новый метод бесшаблонной нанолитографии, в котором в качестве «электронной» маски выступает микросхема микрофокусных рентгеновских трубок с «прострельной» мишенью.

Длительность проекта составила три года и он был закончен 30.06.2020 г. Однако результаты работы по проекту не будут использованы в разработке

первого литографа. Так как результаты проектной работы показали, что лучше использовать более классический вариант — синхротронный или плазменный источник излучения и микрозеркала. Вероятно, это обусловлено большей проработанностью данного варианта, чем объявленного «альтернативного», не дающего, видимо принципиальных преимуществ.

В рамках этой же работы по проекту 2017 года в ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводникового машиностроения», г. Воронеж был создан модульно-кластерный комплекс субмикронной литографии, показанный на рисунке 1.9[99].



а) для автономной работы б)для работы сбезмасочным литографом

Рисунок 1.9 – Модульно-кластерный комплекс субмикронной литографии

Состав кластерного комплекса для автономной работы включает ряд функциональных модулей, а именно модули мегазвуковой очистки, термообработки в парах ГМДС, нанесения антиотражающего покрытия и термостабилизации, которые предназначены для операции очистки и предварительной обработки пластин; модули нанесения фоторезиста, термообработки и термостабилизации, которые предназначены для операции нанесения фоторезиста; модуль проявления фоторезиста, предназначенный для проявления, а также модули загрузки – разгрузки и центральный робот,

являющиеся транспортной системой кластерного комплекса. Есть ещё различные блоки, предназначенные для функционирования отдельных модулей и всего комплекса.

Таким образом, в комплексе объединены три технологических операции: очистки, нанесения и проявления. При этом операции травления в созданном оборудовании нет. Гораздо логичнее в одном комплексе объединить модули операций очистки, и нанесения фоторезиста, а в другом – проявления, травления и очистки. Возможен и третий вариант, в котором объединены все указанные операции в одном кластерном комплексе со шлюзом и транспортом для связи с оборудованием для совмещения и экспонирования.

Состав разработанного кластерного комплекса субмикронной литографии для работы с безмасочным литографом включает в основном то же оборудование, а также, дополнительно, модуль перемещения робота и транспортный модуль для связи с оборудованием для совмещения и экспонирования. Поскольку и в этом варианте кластерного комплекса оборудование для операции травления отсутствует, его также нельзя считать завершённым.

Ввиду отсутствия в составе разработанного кластерного комплекса субмикронной литографии для работы с безмасочным литографом оборудования для операции травления(например, на основе установки сухого плазмохимического травления), данная разработка не вполне соответствует основным задачам технологического процесса фотолитографии и точно не соответствует требованию полной автоматизации.

То есть с точки зрения функционального состава и компоновки спроектированное оборудование отвечает своему назначению, но не обеспечивает полноты технологии. Следует также особо отметить ещё один недостаток разработанного оборудования, который состоит в качественно низких характеристиках наиболее важных модулей, входящих в его состав.

Так, электропривод центрифуги в соответствующем модуле нанесения фоторезиста выбран по диапазону скоростей и максимальному ускорению без

учёта наиболее важного требования к нему, а именно обеспечения высокой линейности динамической скоростной характеристики или постоянства заданного ускорения центрифуги на всём цикле разгона, то есть без применения специально разработанных регуляторов, которые обеспечивали бы компенсацию координатных и параметрических возмущений электропривода центрифуги, характеризующих линейность его динамических характеристик и, в конечном счёте, равномерность толщины формируемой плёнки фоторезиста.

Выбранная конструкция манипулятора центрального робота, входящего в состав транспортной системы, а также использованная в ней кинематическая схема не обеспечивают требуемой надёжности его работы, а именно наработка на отказ этого важного механизма около 1000 н/ч, хотя у зарубежных аналогов этот параметр порядка 10000 н/ч.

Есть недостатки и в модулях термообработки – очевидно низкий ресурс их работы, зависящий от комбинации теплопроводящих и электроизолирующих свойств применённых материалов, а также сравнительной инерционности самого процесса нагрева, обусловленной нерациональной конструкцией нагревательного элемента.

Всё сказанное говорит о решениях, ориентированных на выбор комплектующих без учёта их специальных свойств или использования без соответствующих настроек.

В текущей ситуации переоснащения производственных мощностей необходимо обратиться к зарубежному опыту, предшествовавшему созданию современных кластерных систем.

Поскольку этапы развития кластерных систем у западных фирм имеют общие закономерности, рассмотрим динамику их развития на примере фирмы SOLAR-SEMI GMBH (Германия) [126].

Первая модель компании SOLAR-SEMI – Maximus 802 [131] – простейшая микрокластерная система Micro Cluster System, которая показана на рисунке 1.10, имеющая характеристики, приведенные в таблице 1.2 и следующий состав:

- модуль нанесения фоторезиста;
- модуль термоудара/термостабилизации этажерочного типа;
- модуль загрузки/ разгрузки обрабатываемых пластин (2 кассеты);
- центральный круговой робот с возможностью перемещения по оси Z,
- несущий модуль (станина).

Таблица 1.2 - Основные технические характеристики Maximus 802

Максимальный диаметр обрабатываемых пластин, мм	200
Максимальные обороты ротора центрифуги, об/мин	10000
Максимальная температура термообработки, º С	250

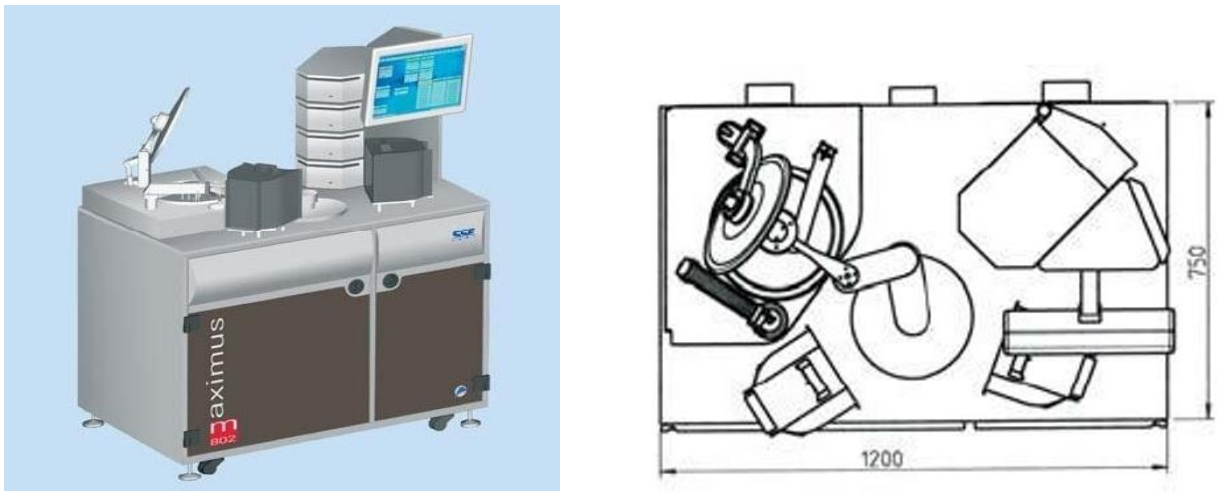


Рисунок 1.10 – Micro Cluster System – Maximus 802

В целом, данный экземпляр кластерной системы ещё далёк был от совершенства, но первый шаг в создании оборудования кластерного типа фирмой был сделан.

Во-первых, в качестве транспортной системы, вместо большого числа дискретных механизмов (механизмы вертикального перемещения разгрузочной и загрузочной кассет, механизм извлечения пластин из кассеты и загрузки пластин в кассету после обработки, транспортный механизм и т.д.) применён один

круговой робот-манипулятор, выполняющий все необходимые операции по перемещению пластин.

Во-вторых, применена позиция термообработки/термостабилизации этажерочного типа, позволяющая уменьшить габариты кластерной системы, упростить аппаратурную реализацию процессов термообработки, согласовать времена обработки на позиции нанесения фоторезиста и позиции термообработки.

Все вышеуказанные достоинства позволили повысить надёжность оборудования, улучшить качество обработки и значительно уменьшить габариты оборудования.

Одним из недостатков данного оборудования была необходимость размещения его в чистых комнатах с повышенными требованиями по созданию соответствующих условий в зоне обработки пластин, для выполнения проектных норм. Кроме того, повышенные требования к проектным нормам требовали создания более совершенного оборудования.

Чтобы исключить довольно жёсткие требования к чистым комнатам и повысить качество, фирма SOLAR-SEMI продолжила совершенствовать конструкцию оборудования, реализовав микрокластерную систему МС-204 таким образом, как показано на рисунке 1.11.

Данная конструкция кластерной системы предназначена для автономной работы кластера с кассетной загрузкой/разгрузкой пластин, её характеристики приведены в таблице 1.3.

Рисунок 1.11 – Кластерная система для нанесения и проявления фоторезиста МС-204

Таблица 1.3 - Основные технические характеристики МС-204

Максимальный диаметр обрабатываемых пластин, мм	200
Максимальные обороты ротора центрифуги, об/мин	10000
Максимальная температура термообработки, º С	250
Температура обработки ГМДС, ºС	до 300
Габаритные размеры LxWxH, мм	1200x1200x2000

В отличие от предшествующей модели Maximus 802, состав кластерной системы МС-204 изменился коренным образоми теперь в систему входят [132]:

- модуль нанесения фоторезиста – 1 шт.;
- модуль проявления фоторезиста – 1 шт.;
- модуль ГМДС – 1 шт.;
- модуль термообработки фоторезиста этажерочного типа с необходимым количеством зон термообработки – 6 шт.;
- модуль термостабилизации (охлаждения пластин) этажерочного типа - 2 шт.;
- модуль загрузки/ разгрузки обрабатываемых пластин – 1 шт. (4 кассеты);
- центральный круговой робот с возможностью перемещения по оси Z – 1шт.;
- модуль подачи ламинарного потока фильтрованного воздуха;
- модуль ограничения пространства вокруг зон обработки пластин;
- несущий модуль (станина).

Требования производства по автоматизации процессов, повышению производительности фотолитографической обработки пластин и необходимость стыковки кластерных систем с установками совмещения и экспонирования продиктовали направление дальнейшего совершенствования кластерных систем.

В этой связи в SOLAR-SEMI разработали модель кластерной системы МС-205 (таблица 1.4, рисунок 1.12), способную встраиваться в линии технологического процесса всей фотолитографии по получению необходимой топологии на пластинах.

Рисунок 1.12 – Кластерная система нанесения и проявления фоторезиста МС-205

Таблица 1.4 - Основные технические характеристики МС-205

Максимальный диаметр обрабатываемых пластин, мм	200
Максимальные обороты ротора центрифуги, об/мин	10000
Максимальная температура термообработки, º С	250
Габаритные размеры LxWxH, мм	1700x1300x2000

В состав системы МС-205 входят [132]:

- модуль нанесения фоторезиста – 2 шт.;
- модуль проявления фоторезиста – 1 шт.;
- модуль термообработки фоторезиста этажерочного типа с необходимым количеством зон термообработки – 8 шт.;
- модуль термостабилизации (охлаждения) этажерочного типа - 2 шт.;
- модуль загрузки/ разгрузки обрабатываемых пластин – 1 шт. (2 кассеты)
- робот, установленный на линейном приводе – 1шт.;
- модуль подачи ламинарного потока фильтрованного воздуха;
- модуль ограничения пространства вокруг зон обработки пластин;
- несущий модуль (станина).

Дальнейшая автоматизация процессов фотолитографии и необходимость стыковки кластерных систем со степперами и со СМИФ-контейнерами привела к

созданию следующей модели кластерной системы МС-208,которая представлена на рисунке 1.13, а характеристики приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Основные технические характеристики МС-208

Максимальный диаметр обрабатываемых пластин, мм	200
Максимальные обороты ротора центрифуги, об/мин	10000
Максимальная температура термообработки, º С	250
Температура обработки ГМДС, ºС	до 300
Габаритные размеры LxWxH, мм	2500x1700x2000

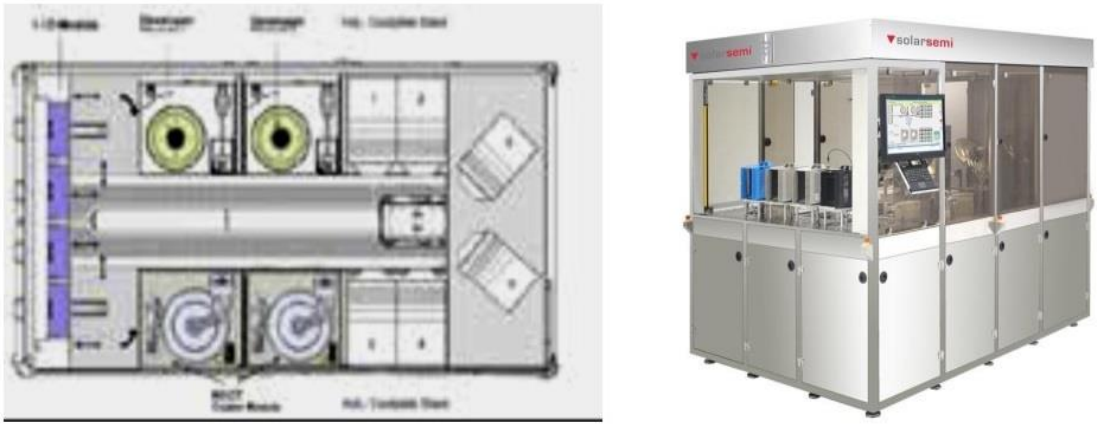


Рисунок 1.13 – Кластерная система нанесения и проявления фоторезиста МС-208

В модели МС-208 применён высокоскоростной центральный робот, назначением которого является выполнение задач по извлечению пластин из кассет, перемещения обрабатываемых пластин по рабочим позициям и передача пластин на второй робот. Второй робот распределяет пластины по 4 специальным позиционным столикам, с которыми взаимодействует робот степпера. После экспонирования на степпере робот степпера возвращает пластины на позиционные вакуумные столики, и второй робот кластера передаёт их на центральный робот для дальнейшего выполнения операций по проявлению

фоторезиста. После выполнения операций по проявлению фоторезиста пластины загружаются центральным роботом в разгрузочную кассету.

В состав системы входят МС-208 [132]:

- модуль нанесения фоторезиста – 2 шт.;
- модуль проявления фоторезиста – 2 шт.;
- модуль термообработки фоторезиста этажерочного типа с количеством зон термообработки – 18 шт.;
- модуль ГМДС – 2 шт.;
- модуль термостабилизации (охлаждения) этажерочного типа - 4 шт.;
- модуль загрузки/ разгрузки обрабатываемых пластин – 1 шт. (2 кассеты);
- робот, установленный на линейном приводе – 2 шт.;
- модуль подачи ламинарного потока фильтрованного воздуха;
- модуль ограничения пространства вокруг зон обработки пластин;
- несущий модуль (станина).

1.5. Описание конструкции отдельных модулей и блоков, входящих в состав кластерных комплексов

Кластерный комплекс фотолитографии состоит из набора модулей, объединённых единой транспортной системой. Каждый модуль реализует определённую технологическую операцию.

Рассмотрим конструкции отдельных, наиболее важных модулей и блоков, определяющих основные характеристики операции нанесения фоторезиста.

Модуль нанесения фоторезиста.

Метод нанесения фоторезиста – на центрифуге. Устройство и принцип действия – вакуумный столик на валу бесконтактного электродвигателя.

Отличительные особенности модуля:

- отсутствие необходимости перестройки при смене диаметра обрабатываемых пластин.

Необходимая корректировка работы вводится программным путём;

- модуль снабжён автоматическим дозатором, позволяющим изменять дозу подаваемого фоторезиста программным путём с блока управления и задания программ обработки;

- модуль оснащается устройством, препятствующим подсыханию фоторезиста в кончике подающего сопла;

- модуль оснащён устройством термостабилизации фоторезиста;

- модуль оснащён устройством позволяющим исключить появление воздушных пузырей в магистрали подачи фоторезиста, тем самым исключается необходимость прокачки фоторезиста при смене ёмкости для фоторезиста;

- перед установкой пластины на столик центрифуги осуществляется процесс её центрирования, тем самым устраняется необходимость центрирования пластины при выемке её из кассеты.

- модуль оснащён системой подачи растворителя для отмывки нижней стороны подложки от фоторезиста, а также промывки торца для удаления «краевого валика».

Модуль термообработки фоторезиста.

Особенности модуля:

- конструкция этажерочного типа (3 позиции нагрева, расположенные в вертикальной плоскости);

- программируемое вертикальное перемещение пластин, позволяющее подобрать наиболее оптимальные режимы охлаждения и термостабилизации.

- повышенная равномерность распределения температуры по нагревательной плите, за счёт применения медной прослойки между нагревателем и верхней плитой, на которой располагается пластина.

Эффект более равномерного распределения температуры возникает за счёт того, что коэффициент теплопроводности меди – 335 ккал/м.час.град., а коэффициент теплопроводности алюминия - 180 ккал/м.час.град. Как видно коэффициент теплопроводности меди значительно выше.

Модуль загрузки-выгрузки пластин.

В модуле загрузки-выгрузки возможно использование 2-х или 4-х кассет, в зависимости от поставленных задач (автономная работа или работа со степпером).

Отличительные особенности модуля загрузки-выгрузки:

- двухэтажное расположение кассет;
- отсутствие механизмов вертикальной транспортировки кассет.

Транспортный модуль. Транспортная система кластерной линии выполнена на базе высокоточного, быстроходного робота-манипулятора специализированного для работы в «чистых комнатах».

Выбранный робот-манипулятор способен осуществлять перемещение пластин в горизонтальной плоскости на разных уровнях по заданной программе. Все исполнительные механизмы робота-манипулятора находятся ниже плоскости перемещения пластины и не вносят никаких загрязнений в зону транспортировки и обработки пластины.

Робот, сам по себе, имеет 4 степени свободы: перемещения по осям X, У, Z и круговое перемещение на 360 градусов.

Погрешность позиционирования пластин составляет ±100 мкм.

Робот-манипулятор осуществляет извлечение пластины из модуля загрузки, перенос пластины между модулями и её возврат в модуль выгрузки по окончанию процесса обработки (при автономной работе) или передачу на оборудование экспонирования (при работе со степпером).

Кластерная компоновка и применение робота манипулятора с линейным перемещением позволяют реализовывать различные последовательности обработки пластины на технологических модулях.

1.6. Технологический процесс нанесения фоторезиста и его параметры

Основные недостатки отечественного оборудования нанесения фоторезиста состоят в качественно низких характеристиках ряда важных

технологических модулей: в первую очередь модулей центрифуги, дозирования, термообработки и термостабилизации.

Существенно повысить указанные характеристики можно только системно.

На рисунке 1.14 показаны параметры процесса нанесения фоторезиста, на котором указаны управляющие воздействия, внешние воздействия, а также контролируемые параметры.

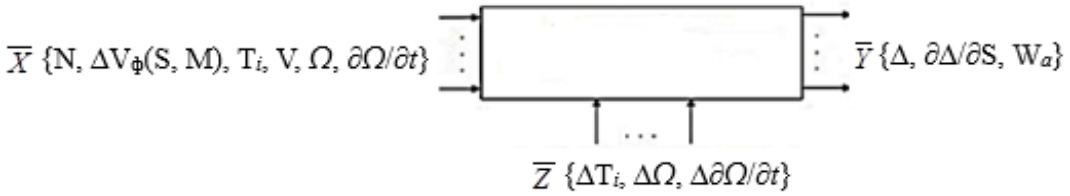


Рисунок 1.14 –Параметры процесса нанесения фоторезиста

На рисунке 1.14 приняты следующие обозначения:

$\overline{X}$ {N, $\Delta V_ф$(S, M), T_i, V, Ω, $\partial\Omega/\partial t$} - управляющие воздействия;

$\overline{Z}$ {ΔT_i, $\Delta\Omega$, $\Delta\partial\Omega/\partial t$} - внешние воздействия;

$\overline{Y}$ {Δ, $\partial\Delta/\partial$S, W_a} - контролируемые параметры;

N - количество подложек в кассете;

$\Delta V_ф$ - объём дозы фоторезиста;

S - площадь поверхности;

M – материал подложки;

T_i – температуры технологических модулей и сред;

V – скорость воздушного потока фильтровентиляционного блока;

Ω - скорость центрифуги;

Δ - толщина слоя фоторезиста;

W_a - обратимая работа адгезии.

Задачу управления динамическим режимом установки нанесения сформулируем следующим образом. Введение в качестве обратной связи функцию (1.4) изменения угла опережения включения в зависимости от величины

заданного ускорения позволит обеспечить постоянство угла наклона скоростной характеристики центрифуги, т.е. равномерность толщины плёнки фоторезиста.

$$\Theta_i = \Theta_к \left[1 - \frac{\frac{d\Omega_i}{dt}}{\frac{d\Omega_з}{dt}} \right], \tag{1.4}$$

где: $\Theta_к$ - критический угол опережения включения;

$\frac{d\Omega_i}{dt}$ - текущее ускорение;

$\frac{d\Omega_з}{dt}$ - заданное ускорение.

Задачу управления температурным режимом установки нанесения сформулируем следующим образом. Необходимо поддерживать в заданных узких интервалах вектор температур используемого фоторезиста, а также рабочих поверхностей модулей термообработки и термостабилизации при включенном фильтровентиляционном блоке, формирующим ламинарный поток воздуха, эффективно охлаждающем последние за счёт конвенции, при которых производная целевой функции по времени стремиться к нулю:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial Ti}{\partial t} \to 0. \tag{1.5}$$

Главными проблемами, которые требуется решить, являются следующие:

- обеспечение линейности динамической скоростной характеристики или постоянства заданного ускорения центрифуги на всём цикле разгона и, в конечном счёте, равномерности толщины формируемой плёнки фоторезиста;

- точный контроль температуры наносимого фоторезиста и рабочих поверхностей термоплит, а также временных интервалов обработки, обеспечивающих адгезионные свойства сформированного слоя фоторезиста;

- наличие системы управления с развитым многофункциональным интерфейсом, приводящее к сокращению времени обработки и повышению

надёжности работы, а также обеспечивающее удобство эксплуатации оборудования.

1.7. Выводы по главе 1

Для достижения требуемых проектных норм необходимо соответствовать основному критерию, который является уровнем технологии фотолитографии и оборудования для их реализации.

Основные недостатки отечественного оборудования нанесения фоторезиста состоят в качественно низких характеристиках ряда важных технологических модулей: в первую очередь модулей центрифуги, дозирования, термообработки и термостабилизации.

В России имеются запатентованные наработки, применяющиеся в безмасочной рентгеновской литографии. Такая технология даёт возможность печатать малые серии процессоров, которые в свою очередь будут иметь приемлемую себестоимость. Если особенность такой технологии, которая заключается в том, что при сравнении с традиционной фотолитографией, для которой себестоимость одного чипа уменьшается с ростом серии, в безмасочной литографии себестоимость чипа остаётся постоянной и от объемов серии практически не зависит. Но есть и минус данной технологии – это показатель производительности, который на порядки ниже при сравнении с традиционной фотолитографией. Зато плюсов больше, одним и самых весомых является низкая стоимость самого оборудования. Причём можно заметить, что и за рубежом не развито такое оборудование и не применяется, оно находится на стадии разработок.

В развитии российского оборудования неизбежным становится переход от автоматизированных линий фотолитографии на трековой платформе к комплексам оборудования на кластерной платформе, что полностью отвечает современным мировым концепциям построения оборудования такого класса.

Оборудование на кластерной платформе, которое соответствовало бы мировому уровню, отсутствует на отечественном рынке российского оборудования для фотолитографии. Модульно-кластерный комплекс субмикронной литографии, разработанный в рамках проекта 2017 года в ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводникового машиностроения», г. Воронеж, с точки зрения функционального состава и компоновки отвечает своему назначению, но не обеспечивает всей полноты технологии [30]. Главные же недостатки разработанного оборудования состоит в качественно низких характеристиках ряда важных технологических модулей.

Современная продукция микроэлектроники обеспечивает приемлемые цены только в условиях массового производства, поэтому выпускаемое оборудование должно характеризоваться высокой степенью автоматизации, компактностью конструкций, применением стандартных модулей, в том числе стандартного механического интерфейса, связывающего эти модули и позволяющие автоматизировать различные технологические операции.

Представлена схема параметров процесса нанесения фоторезиста, на которой указаны управляющие воздействия, внешние воздействия, а также контролируемые параметры.

Сформулированы законы управления динамическим и температурным режимами установки нанесения фоторезиста.

ГЛАВА 2. КОНСТРУКЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ НАНЕСЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА

2.1. Параметры, влияющие на технологический процесс нанесения фоторезиста и практические рекомендации по проектированию

Не все физические параметры, влияющие на техпроцесс нанесения фоторезиста, изучены одинаково хорошо. Тем не менее, основные (ускорение, угловая скорость, дозировка подачи фоторезиста, температурные и другие параметры рабочих сред) могут быть оптимизированы так, что удаётся получить слой фоторезиста с необходимым качеством [70, 142, 151].

Фоторезист состоит из органических полимеров и светочувствительных компонентов, находящихся в растворителе [18, 123]. Благодаря последнему, фоторезист и является жидкостью (фоторезист может иметь самую различную вязкость, которая зависит от содержания растворителя в его составе и от температуры).

Фоторезист может подаваться на пластину, которая находится в неподвижном состоянии, либо на пластину, которая медленно вращается. Важна при нанесении скорость выдачи дозы фоторезиста [73, 96].

Тип сопла также вносит свои коррективы относительно качества плёнки фоторезиста. Разрабатываются и применяются различные методы по удержанию резиста в трубке, так как этот момент тоже является важным при работе с фоторезистом [7].

При нанесении фоторезиста на пластину, которая умеренно вращается, под действием центробежных сил он начинает растекаться на пластине. Как только резист распределится по всей поверхности пластины, её скорость вращения увеличивается с заданным ускорением. Ускорение центрифуги оказывает значительное влияние на равномерность плёнки. Замечено, что достичь требуемых тонких и равномерных плёнок можно при увеличении ускорения [113, 117].

Такое фактор, как колебание ускорения, также влияет на равномерность плёнки. Необходимо минимизировать колебания ускорений [70].

Ряд конструктивных особенностей центрифуги для нанесения фоторезиста связано с физическими основами самого технологического процесса нанесения методом центрифугирования. Так, столик с размещённой на нём пластиной, удерживаемой вакуумом, размещён в специальной чашей для сбора некоторого количества фоторезиста, сбрасываемого с рабочей поверхности пластины. Для отвода жидкого резиста и его паров используютс разнообразные конструктивные решения [114], которые определяются уже аэродинамическими эффектами. Так, например, дефлекторного кольцо, предназначенное для того, чтобы резист не возвращался из слива, установленное не параллельно плоскости, в которой вращается пластина, изменяет характер истока потока воздуха, что приводит к возвращению резиста и его паров в чашу и, соответственно, к потере качества техпроцесса.

Правильное горизонтальное положение центрифуги тоже влияет на равномерность плёнки [95]. Если останется угол наклона при установке оборудования, то и пластина будет располагаться также под наклоном, и тогда резист непременно будет стекать на край, что в итоге приводит к браку.

В центрифугах, предназначенных для работы на высоких скоростях, особое значение приобретает балансировка их ротора. При этом необходима не только статическая, но и динамическая балансировка. На самой центрифуге имеются различные механизмы для центровки пластин, срабатывающие до вакуумного схвата, что особенно актуально для пластин сравнительно большого диаметра (150 и 200 мм), без которых балансировка ротора центрифуги бессмысленна.

Свойства формируемого слоя фоторезиста во многом определяются количеством растворителя в нём, поэтому большую актуальность приобретает контроль скорости потока отводимых из центрифуги газов, от которого зависит процесс испарения растворителя [140].

Ещё одним из параметров, который необходимо контролировать, является влажность. Влага оказывает воздействие не только на сам резист, но и на адгезию фоторезиста. Имеются рекомендации, что позитивный резист лучше наносить на поверхность немного влажную. Считается, что влажность менее 50% наиболее подходящая.

Большую роль играет и вытяжная система. При отводе резист в слив с недостаточной энергичностью, капли резиста рикошетом могут попасть вновь на пластину с отрицательным эффектом. Но это только часть работы вытяжки. Для получения на пластинах диаметром 150, 200 мм плёнок с разбросом ± 20 Å, необходимо иметь высокопроизводительную вытяжную систему [7].

При высоких значениях пускового момента большое ускорение можно достичь на разных, в том числе довольно низких скоростях вращения центрифуги. Выбор верхнего значения скорости определяется скоростью испарения растворителя с поверхности пластины, которая существенно зависит от скорости вращения ротора центрифуги, а также от её равномерности. При этом колебания скорости центрифуги вызывают колебания скорости испарения резиста, то есть влияют на равномерность толщины покрытия.

Колебания давления воздуха в рабочем помещении воздействуют на равномерность. Например, во время центрифугирования открыли дверь в помещение с меньшим давлением, то, как следствие, упадёт давление и в жёлтой комнате. Соответственно и на центрифуге изменится в меньшую сторону давление, скорость испарения растворителя изменится и толщина плёнки фоторезиста тоже изменится. Во избежание таких ситуаций используют специальные вентили, которые способны компенсировать такие перепады давления, обеспечивая тем самым постоянство давления вблизи центрифуги.

Для улучшения качества наносимой плёнки можно специально снижать испарения. Например, при отключении вытяжки во время подачи резиста и при включении её обратно во время центрифугирования можно повысить равномерность наносимой плёнки.

Необходимость применения двух модулей температурной обработки связано с формированием слоя фоторезиста и качества формируемой плёнки. На первом модуле термообработки, иногда называемом модулем термоудара, идёт при повышенных температурах и позволяет полностью удалить растворитель из резиста, на втором модуле – модуле термостабилизации идёт обработка при пониженной, по сравнению с модулем термоудара, температуре, что в целом улучшает атгезию фоторезистивного слоя к пластине. В зависимости от типа резиста температура на этом этапе своя, но как правило она не превышает 250 ºС. Причем и время производимой операции зависит от температуры, но обычно не превышает 60 сек [7].

Фоторезист необходимо правильно охлаждать и это является важным этапом для удержания стабильности технологического процесса, так как температурно-временной профиль влияет на свойства плёнки резиста. Температура должна быть соизмерима с температурой окружающей среды. Время термостабилизации будет зависеть от температуры подложки после выхода с предыдущей позиции, но обычно не превышает 30 сек.

Важным моментом является высокая чувствительность к малейшим частицам, которые загрязняют поверхность пластины и способны привести к браку в ходе её обработки.

Федеральный стандарт США 209E определяет «запыленность» рабочих помещений. Номер класса чистоты помещения – число частиц размером 0,5мкм в 1 кубическом футе (0,3048 м). В 1 $м^3$ воздуха комнаты класса 10 не более 300 частиц, а класса 100 – не более 3600 частиц [145].

Класс чистоты помещения, в котором установлено оборудование фотолитографии определяется технологической нормой. Первый класс чистоты (ISO Class 1) соответствует технологической норме 180 нм. При нанометровых технологиях вопрос загрязнений всё более существенно сказывается на проценте брака изделий, вплоть до невозможности осуществлять сам техпроцесс, для которого частицы сравнимых и даже больших размеров, чем топологическая

норма, вызывают повреждения схем. Для процесса нанесения фоторезиста характерно, что частицы, попадающие на рабочие поверхности, вымываются во время проявления, образуя дефекты топологических схем [146].

Чистые исходные материалы гарантия чистого резиста [137, 138]. Чтобы сократить вероятность появления загрязнений разработчики и изготовители оборудования стремятся сократить в оборудовании наличия движущихся частей, которые способны генерировать частицы. Соответственно используются вращающиеся или движущиеся детали так, чтобы их расположение было под поверхностью пластин или изолированы совсем, тем самым изолировав пластину от попадания на неё загрязнений. Стараются заменить ремённые устройства, так как ремни способны генерировать статическое электричество, которое с высокой вероятностью притянет малейшую частицу к пластине [136, 149].

Кроме того, от самого резиста можно получить загрязнения. Такого типа загрязнения концентрируются в зонах временного хранения резиста. Происходит разбрызгивание фоторезиста при смене бутылей, что со временем приводит к концентрации загрязнений. Затем есть вероятность попадания пыли в ёмкость резиста вместе с засохшим резистом.

Для исключения брака, вызванного засыханием фоторезиста в системе его подачи из рабочей ёмкости, применяются специальные устройства для герметизации [7], предназначенные для предотвращения попадания воздуха в систему подачи фоторезиста.

Требования к параметрам слоя фоторезиста и технологическим режимам для его формирования

Поверхность пластины должна быть полностью покрыта однородным слоем фоторезиста, диапазон варьирования толщины которой должен быть ±0,0025мкм (3σ) для пленок толщиной 0,03 ÷ 3 мкм и ±0,025мкм (3σ) для пленок толщиной более 3 мкм.

На поверхность пластины влияют и внешние факторы, которые характеризуются такими параметрами как температура окружающей среды, приращение температуры, влажность, приращение влажности, воздушный поток, чистота помещения. Поэтому предъявляются требования по контролю за ними, которые необходимо соблюдать [123, 144, 150].

Важное значение имеет поддержание стабильности температуры фоторезиста/проявителя.

Температура фоторезиста влияет на его вязкость, от чего напрямую зависит толщина наносимого слоя. Здесь можно добавить, что от температуры проявителя зависит скорость химической реакции проявления и, соответственно, разброс линейных размеров элементов.

Режимы процесса нанесения должны иметь:

- установленные климатические параметры температуры и влажности,
- контроль температуры фоторезиста (проявителя),
- разброс температуры резист/проявитель < ± 0,2 °C.

К горячим плитам для термообработки пластин предъявляются особые отдельные требования, так как такие плиты способны нести несколько различных функций и быть ориентированы на различные процессы.

Возможные функции горячих плит:

- низкотемпературные горячие плиты;
- высокотемпературные горячие плиты;
- прецизионные горячие плиты;
- термостабилизирующие холодные плиты.

Управление граничными значениями температуры горячей и холодной плиты.

Равномерность температуры:

– для LHP (низкотемпературная горячая плита):

(50,0÷90) °C, разброс <±0.5 °C,

(90,1÷120) °C, разброс <±0.7 °C,

(120,1÷150) °C, разброс <±1 °C,

(150,1÷200) °C, разброс <±1.4 °C.

– для HHP (высокотемпературная горячая плита):

(50,0÷120) °C, разброс <±1 °C,

(120,1÷150) °C, разброс <±1,5 °C,

(150,1÷200) °C, разброс <±2 °C,

(200,1÷300) °C, разброс <±3 °C,

(300,1÷350) °C, разброс <±5 °C.

– для PHP (прецизионная горячая плита):

(50,0÷120)°C, разброс <±0,2 °C,

(120,1÷150)°C, разброс <±0,3 °C,

(150,1÷200)°C, разброс <±0,5 °C,

(200,1÷250)°C, разброс <± 0,6 °C.

При нанесении фоторезиста методом центрифугирования важно контролировать техпроцесс, в котором необходимо следить за скоростью вращения центрифуги, равномерностью скорости ротора центрифуги, диапазоном регулирования ускорения центрифуги, точностью подачи дозы фоторезиста.

Для того, чтобы снизить брак и провести последующие операции фотолитографии, необходимо выполнить функцию удаления краевого валика (EBR) с управляемыми значениями ширины. Применяют функцию отмывки обратной стороны с помощью растворителя с целью снижения дефектности от процессов нанесения и проявления.

2.2. Разработка базового технологического процесса на автоматизированной установке нанесения фоторезиста

Модель системы управления для автоматизации технологического процесса нанесения фоторезиста показана на рис. 2.1.

Фоторезист может подаваться на пластину, находящуюся в неподвижном состоянии, а может медленно вращаться. Под действием центробежных сил фоторезист растекается на пластине. Как только вся площадь пластины покроется резистом, так сразу должна возрасти скорость вращения пластины [150].

Требуемая для получения СБИС равномерность плёнок резиста обеспечивается при условии, что колебания по скорости будут минимальны. Другим влияющим параметром является ускорение. Достичь тонких и равномерных плёнок можно при более высоких уровнях ускорения.

Рисунок 2.1 – Структура автоматизированной системы управления технологическим процессом нанесения фоторезиста

Технологическая позиция нанесения фоторезиста:

- устройство и принцип действия – вакуумный столик на валу бесконтактного двигателя электропривода центрифуги;

- метод нанесения фоторезиста – на центрифуге;

- режимы нанесения фоторезиста– динамический (с радиальным сканированием подающей трубки);

- промывка края пластины (снизу) от края, мм – 2 ÷ 7;

- отмывка края пластины на рабочей стороне от края, мм – не более 5;

- система подачи агента для от резиста;

- диапазон регулирования скорости центрифуги, рад/с – (1÷1000);

- равномерность скорости ротора центрифуги, рад/с – 0,1;

- ускорение центрифуги, рад/с^2 – $(4 \div 10)\cdot 10^3$;

- коэффициент линейности динамической характеристики, % – 0,99;

- диапазон задания времени выполнения процессов, с – 0,5 ÷10;

- дискретность задания времени, с – 0,1;

Система дозирования резиста:

- диапазон дозирования, мл – 1,0 ÷ 5,0;

- точность дозирования, мл – 0,1;

- количество используемых резистов, шт. – 2;

- ёмкость для резиста, л – 1;

- система обеспечивает дозирование и подачу на пластину резиста с вязкостью, сСт – 1,0÷45;

Система термостабилизации резиста и контроля температуры:

- термостабилизация, регулирование температуры фоторезиста и контроль количества фоторезиста в ёмкости;

- диапазон регулирования температуры, ºС – (18÷40) ±0,5;

- дискретность задания температуры, ºС – 1.

Время и температуру сушки плёнки резиста необходимо контролировать. Так как к ухудшению разрешения и стойкости плёнки может привести как недостаточность температуры и/или времени сушки в пленке.

Технологическая позиция термообработки:

- диапазон задаваемой температуры горячей плиты, ºС – (80 ÷ 200);

- дискретность задаваемых температур, ºС – 0,1;

- диапазон задаваемого времени сушки фоторезиста, с – (1 ÷ 60);

- равномерность и стабильность температуры по пластине в диапазоне:

(80÷120) ºС ‹ ± 0,5;(120÷160) ºС ‹ ± 0,8;(160÷200) ºС ‹ ± 1,4;

- программируемое вертикальное перемещение пластин с шагом, мм – 0,1.

Три программируемых режима работы:

- контактный режим работы с пластиной;

- режим вакуумного контакта с пластиной;

- режим близкого расстояния до пластины.

Термостабилизация перед загрузкой в кассету служит для охлаждения и выдержки подложек после термообработки для предотвращения дополнительных термомеханических напряжений из-за разницы коэффициента температурного расширения подложки и фоторезиста. Сама подложка охлаждается до заданной температуры при контактной обработке на «холодной плите», во внутренней полости которой циркулирует термостабилизируемая вода. Резкое охлаждение может привести к потере адгезии и появлению трещин.

Тип сопла и применяемый метод удержания резиста в трубке также сказывается на качестве плёнки фоторезиста. После того, как выдача резиста завершилась, жидкость из трубки не должна быть проронена на элемент.

Чтобы иметь на пластинах диаметром 150 и 200 мм плёнку с разбросом ± 20 Å, необходимо в техпроцессе применять мощную фильтровентиляционную систему [7]. Необходимо учитывать создаваемые потоки от испарения растворителя с колебанием скорости испарения резиста, при условиях, что поток воздуха над пластиной не равномерный и не постоянный. Такое сочетание колебания потоков даст неравномерность покрытия. Удаление избыточного резиста, при технологическом процессе, проводится сразу после окончания операции центрифугирования. Метод удаления резиста при замедлении скорости - это растворение резиста в химических веществах. С помощью распыляемого

вещества под действием капиллярных сил на обратную сторону пластины достигается смыв лишнего резиста [7].

2.3. Общая компоновка и технические характеристики автоматизированной установки нанесения фоторезиста

Опытный образец автоматизированной установки нанесения фоторезиста в кластерном конструктивном исполнении, который был разработан в конструкторским бюро технологических машин [90], входящим в инженерно–технический центр АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий» [76], впервые был показан на VIII - ом межрегиональном форуме «Воронежская область – ваш партнер», проводившемся 15 - 17 сентября 2011 в г.Воронеж, соответствующие материалы приведены в приложении А. В последующие годы (порядка 10 лет) конструкция основных технологических модулей и программное обеспечения для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста постоянно совершенствовались.

За этот промежуток времени было поставлено несколько различных модификаций указанного оборудования на такие предприятия как ОАО «Лианозовский электромеханический завод»[98] (Лианозовские радары)ПАО «НПО «АЛМАЗ», г. Москва; Ордена Трудового Красного Знамени «Институт химии силикатов» имени И.В. Гребенщикова»[115], г. Санкт-Петербург; АО «Государственный оптический институт» им. Вавилова» [78], г. Санкт-Петербург и др. на основании госконтрактов и прямых НИОКР АНОО ВО «Международным институтом компьютерных технологий». Акты о внедрении результатов работы, полученных лично автором диссертационной работы, внедрённых в НИОКР АНОО ВО МИКТ и в учебный процесс в АНОО ВО МИКТ, приведены в приложениях Б и В соответственно.

За период с 2011 г. по 2021 г. было поставлено порядка 10 единиц различных модификаций данного оборудования на предприятия РФ, с ожидаемым экономическим эффектом около 100 млн рублей.

Общий вид автоматизированной установки нанесения фоторезиста показан на рисунке 2.2. Нижняя часть кабины установки состоит из сварного металлического каркаса, покрытого порошковой краской, дно каркаса закрыто нижней панелью из полированной нержавеющей стали на которую установлен блок с промышленной IBM PC, электрический шкаф и ёмкость для отработанного фоторезиста.

На каркасе установлены все рабочие органы установки, а также электромонтажные короба, в которых проложены электрические провода и кабели. С трех сторон на каркасе установлены съемные панели из нержавеющей стали, обеспечивающие быстрый доступ ко всем узлам установки.

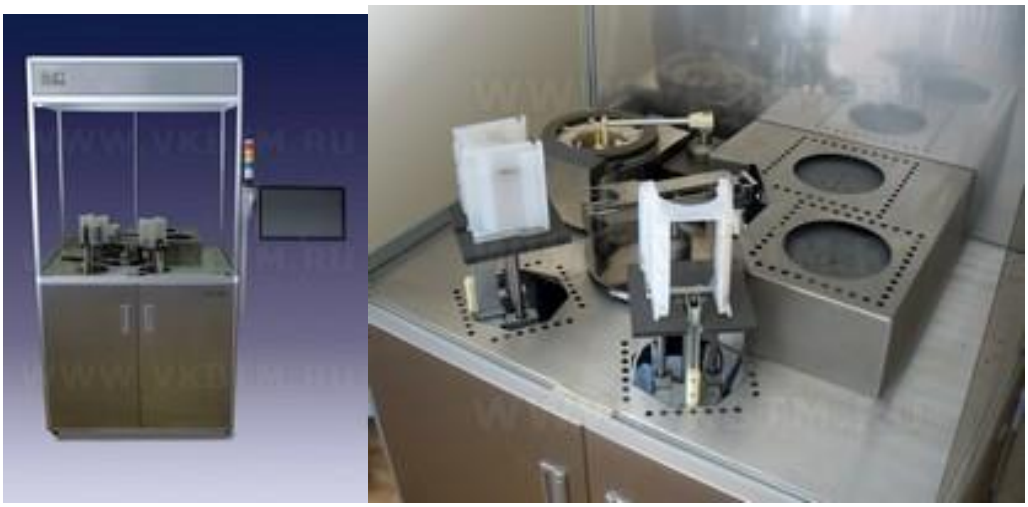


Рисунок 2.2 – Автоматизированная установка нанесения фоторезиста

На рисунке 2.3 показана автоматизированная установка нанесения фоторезиста с блоком обеспыливания, установленная на производстве.

С передней стороны каркаса имеются распашные двери, также из нержавеющей стали, через которые осуществляется обслуживание (замена ёмкости с фоторезистом, включение и отключение питания, настройка модулей и т.п.). На задней панели расположены элементы для внешнего подключения установки: патрубок вытяжной вентиляции, штуцер подвода сжатого воздуха,

штуцер подвода азота (опция), болт заземления. Сам каркас установлен на подвижных опорах (транспортные колеса) для перемещения установки и имеются регулируемые опоры, позволяющие выставить установку по уровню и высоте.

Рисунок 2.3 – Автоматизированная установка нанесения фоторезиста с блоком обеспыливания на производстве

Непосредственно над каркасом установлен ламинарный шкаф, который представляет собой отдельный модуль и может сниматься с нижней части установки целиком без разборки для обеспечения транспортировки внутри помещений. Ламинарный шкаф состоит из разборного алюминиевого каркаса, задняя стенка которого закрыта панелью из нержавеющей стали, боковые панели изготовлены из тонированного стекла, а передняя часть имеет распашные стеклянные дверцы. Все стеклянные панели для безопасности покрыты бронепленкой. Сверху шкафа закреплен фильтровентиляционный блок (ФВБ). ФВБ создает однонаправленный поток (сверху вниз) очищенного системой фильтров воздуха, который поддерживает постоянное положительное давление чистого воздуха в кабине, чтобы предотвратить проникновение загрязненного воздуха из помещения и всасывается вытяжной вентиляцией через

перфорированную рабочую поверхность. Сбоку кабины на стойке установлен регулируемый кронштейн с закрепленным на нем сенсорным монитором, также на стойке размещен трехцветный сигнальный светофор, показывающей режимы работы (простой, работа, авария).

Установка состоит из модулей: загрузки/приёмки пластин, транспортного модуля – манипулятора, центрифугирования, инструмента дозирования фоторезиста, подогрева фоторезиста, термообработки, термостабилизации, а также имеется система управления установкой и защитный бокс [11]. Расположение модулей на установке представлено на рисунке 2.4.

Потребительские и технические характеристики установки приведены в таблице 2.1., 2.2. и на сайте ВКБТМ [111].

Основные параметры рассматриваемой продукции не хуже зарубежных аналогов [106, 118]. Система управления установкой основана на базе промышленной IBM PC.

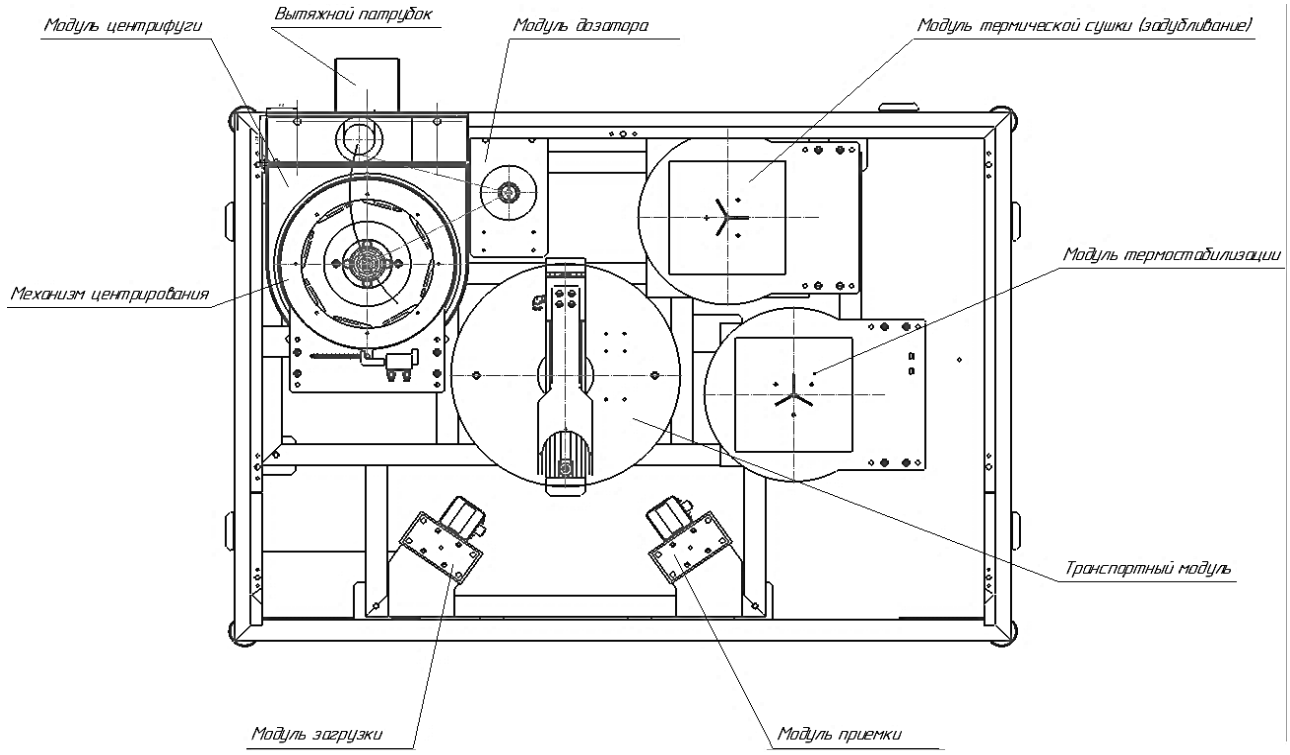


Рисунок 2.4 – Расположение модулей на установке

Таблица 2.1 - Технические характеристики установки

Диаметр обрабатываемых пластин, мм	150 ÷ 200
Привносимая дефектность для частиц размером > 0,2 мкм	<0,05 деф./см^2
Среднее время наработки на отказ (MTBF), час	10000
Среднее время ремонта (MTTR), час	1
Габариты установки, мм (LxWxH)	1030x750x2000

На сайте конструкторского бюро технологических машин [91] приведен видеоматериал по рабочему циклу автоматизированной установки нанесения фоторезиста, который показывает работу всех её функциональных модулей.

Таблица 2.2 - Потребительские характеристики установки

Диапазон регулирования скорости центрифуги, рад/с	0,1 ÷ 1000
Равномерность скорости ротора центрифуги, рад/с	± 0,1
Ускорение центрифуги, рад/с^2	$(4 \div 10)\cdot 10^3$
Коэффициент линейности скоростной характеристики, о.е.	0,999
Дискретность задания частоты вращения, рад/с	0,1
Диапазон регулирования температуры фоторезиста, °С	18 ÷ 50 ± 0,1
Диапазон задания времени обработки подложки, сек	0,5 ÷ 999
Дискретность задания времени обработки подложки, сек	0,1
Диапазон дозирования фоторезиста, мл	0,5 ÷ 5,0
Точность дозирования фоторезиста, мл	± 0,1
Диапазон задания температуры «горячей плиты», °С	70 ÷ 200
Точность поддержания температуры «горячей плиты»:	
80÷120°С	± 0,3 °С
120÷160 °С	± 0,5 °С
160÷200 °С	± 1,0 °С
Максимальная потребляемая мощность, кВт	3,5

2.4. Особенности конструкций модулей установки

Особенности конструкции модуля центрифуги

Модуль центрифуги, который представлен на рисунке 2.5, содержит:

– БДПМ,

– узел ротора центрифуги (содержит вал, подшипники, обойма ротора, вакуумная втулка, крышки подшипников, кольца, штуцер подвода вакуума, гайка).

– механизм подъема ротора, состоящий из трех опор, две из которых неподвижны, а одна, на которой закреплен ротор, соединенный с электродвигателем через магнитную муфту, имеет возможность вертикального перемещения по направляющим при помощи линейных подшипников. Перемещение ротора с муфтой и двигателем осуществляется пневмоцилиндром, закрепленным на нижней неподвижной опоре.

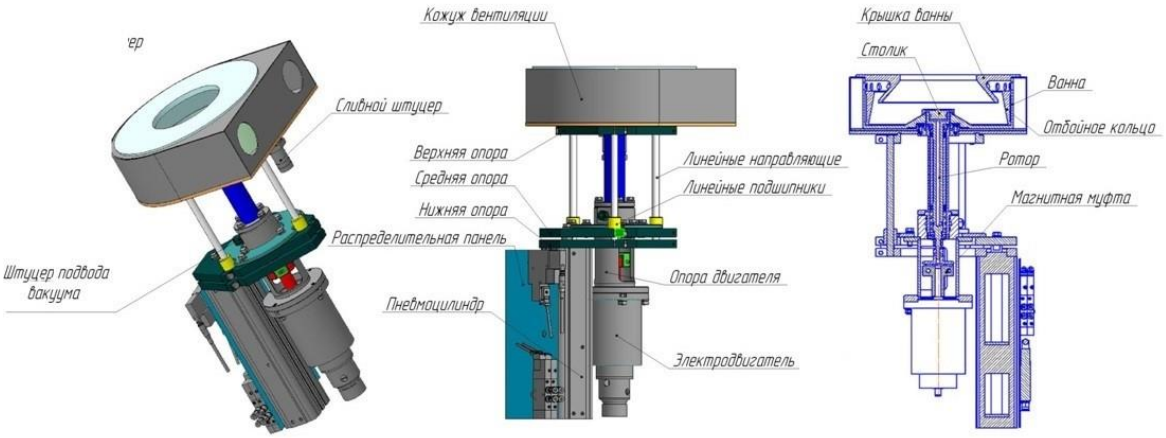


Рисунок 2.5 - Модуль центрифуги

Механизм подъема ротора закреплен на плите через верхнюю опору. Приёмный столик центрифуги имеет на опорной поверхности концентрические канавки и центральное отверстие, через которые обрабатываемая подложка прижимается к опорной поверхности при помощи вакуума. Также на цилиндрической поверхности столика имеется кольцевая канавка под уплотнительное резиновое кольцо. Это уплотнение не позволяет проникать парам фоторезиста внутрь установки во время операции нанесения.

Ванна служит для защиты установки и оператора от брызг и состоит из внешней ванны, внутреннего отбойного кольца и крышки. Отбойное кольцо не дает брызгам фоторезиста при операции центрифугирования попадать на обрабатываемую пластину, для этих же целей служит обратный конус, изготовленный непосредственно на крышке.

Также на дне ванны установлена втулка с иглой подачи жидкости для отмывки краевого валика обрабатываемой пластины и штуцер для слива отработанного фоторезиста. Детали ванны устанавливаются на плиту по скользящим посадкам, что позволяет легко и быстро их разбирать для очистки и обслуживания.

Кожух вентиляции служит для вытяжки паров фоторезиста, выполнен из нержавеющей стали и имеет два отверстия диаметром 60мм с вваренными трубками, к которым подключается внешняя вытяжная вентиляция.

Механизм центрирования, который представлен на рисунке 2.6, служит для точной центровки обрабатываемых пластин при их автоматической установке на столик для последующей обработки, что приводит к минимальным значениям дисбаланса при вращении пластины.

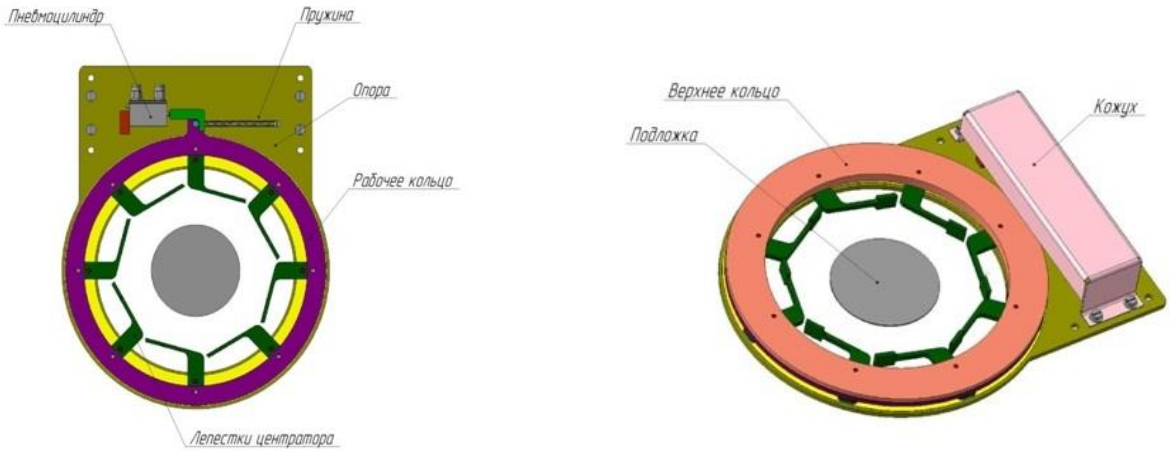


Рисунок 2.6 – Механизм центрирования

Механизм работает при помощи пневмоцилиндра, непосредственно на нем установленного, а сам механизм центрирования устанавливается на опорную плиту модуля центрифуги.

Одной из основных проблем в центрифугах данного типа является создание вакуума между столиком и обрабатываемой пластиной для удержания последней.

В процессе работы над установкой были рассмотрены несколько вариантов подачи вакуума на столик. Ранее в установках подобного типа подача вакуума осуществлялась при помощи втулки, закрепленной на нижнем конце вала электродвигателя, при этом использовались двигатели с полым валом.

В последнее время стало невозможно приобрести такие двигатели, поэтому было принято решение использовать покупные серийные электродвигатели с массивными валами и создать узел подачи вакуума, минуя вал двигателя.

На рисунке 2.7приведены схемы подвода вакуума новой конструкции, на которую получен патент «Устройство передачи вакуума через вращающийся вал» [48].

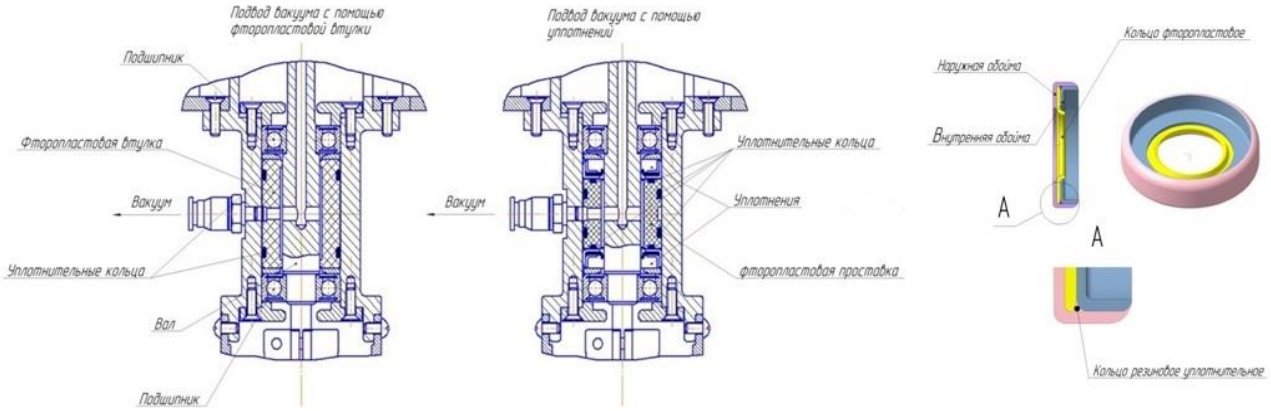


Рисунок 2.7 – Варианты подвода вакуума

На одном экспериментальном образце использовалась втулка из фторопласта Ф – 4 и устанавливалась прижимной поверхностью к валу по всей длине вакуумной втулки. Но при таком варианте эксплуатации сильно нагревалась сама втулка и вал.

Во втором варианте втулку из фторопласта Ф – 4, заменили на втулку из коксонаполненного фторопласта марки Ф4К20, так как износостойкость этого в 600 раз выше, чем у фторопласта Ф – 4, на 30% выдерживает выше напряжение при 10% деформации сжатия в интервале температуры от – 60°С до +250°С, а также по сопрягаемой длине втулки с валом сделали проточку, оставив сверху и

снизу бортики высотой 3мм. При этом варианте существенно уменьшился износ втулки и разогрев от трения деталей ротора.

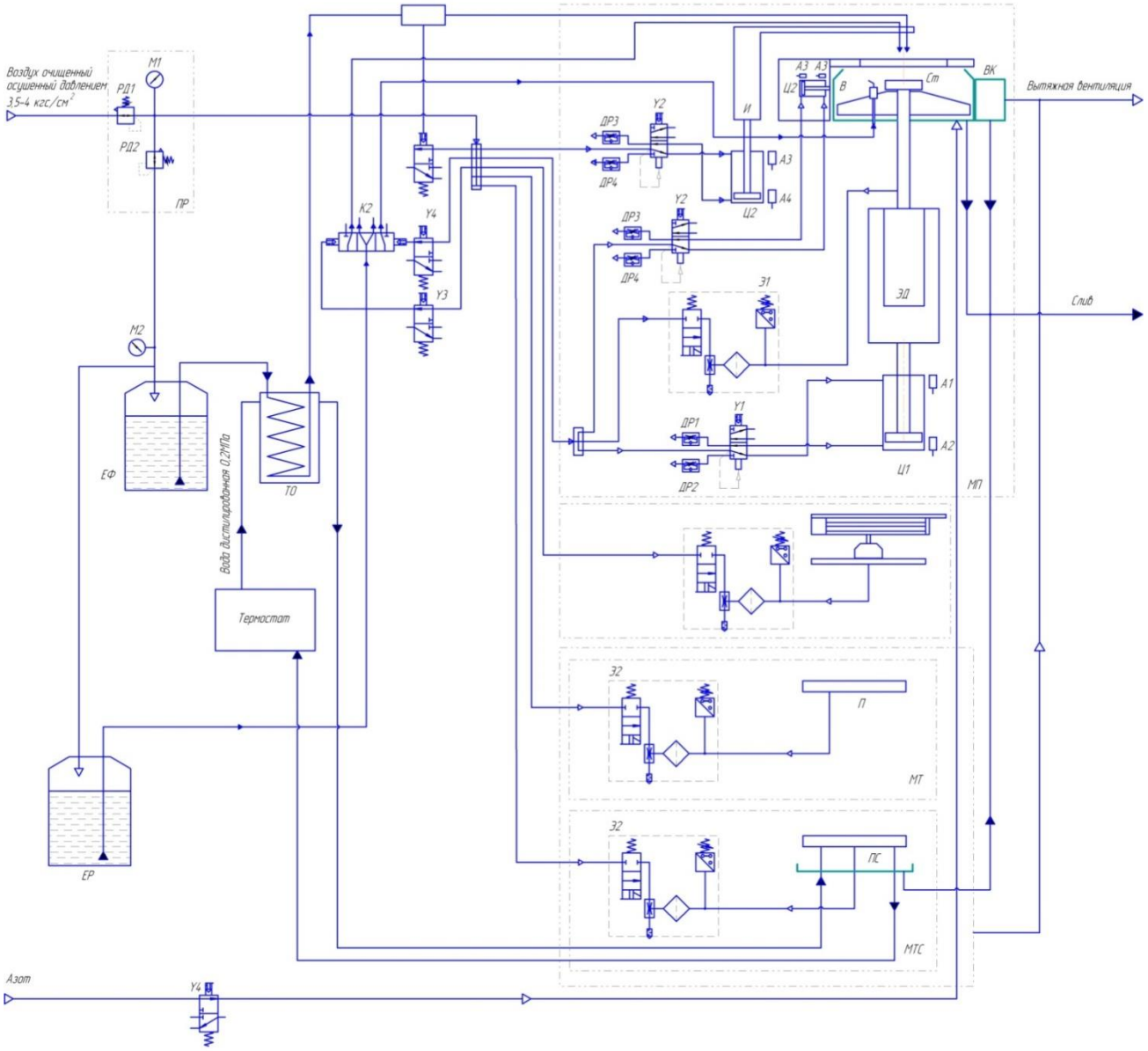
В третьем варианте была заменена фторопластовая вакуумную втулка на уплотнения специальной конструкции и специального материала.

В этих уплотнениях рабочим элементом является кольцо с бортиком из коксонаполненного фторопласта с минимальным контактом с валом, представленное на рисунке 2.6. Установив два зеркально расположенных уплотнения, удалось значительно снизить трение без существенной потери вакуума в системе ротора, что позволяет работать на установке при выпуске крупной серии продукции в автоматическом режиме без остановки на охлаждение.

Магнитная муфта, которая показана на рисунке 2.8, состоит из двух полумуфт с запрессованными в них неодимовыми магнитами, имеющими разную полярность для верхней и нижней полумуфты, что в сою очередь компенсирует несоосность между валом двигателя и валом ротора и минимизирует биение ротора.

Рисунок 2.8 – Магнитная муфта

На рисунке 2.9 показана пневмогидросхема разработанной автоматизированной установки фоторезиста.



А1–А4	Датчик положения SME-8-K-LED-24
В	Ванна
ВК	Вытяжной короб
ДР1–ДР4	Дроссель с обратным клапаном
ЕФ	Емкость с фоторезистом
И	Привод инструмента
К1,К2	Клапан пневмоуправляемый
М1,М2	Манометр
МН	Модуль нанесения
МТ	Модуль термообработки
МТС	Модуль термрстабилизации
П	Плита термообработки
ПР	Панель распределительная
РД1	Регулятор давления
РД2	Регулятор давления
Ст	Столик
ТО	Теплообменник
Ц1	Пневмоцилиндр
Ц2	Пневмоцилиндр
Э1, Э2	Вакуумный генератор
ЭД	Электродвигатель
Y1, Y2	Распределитель
Y3, Y4	Клапан

Рисунок 2.9 – Пневмогидросхема автоматизированной установки нанесения фоторезиста

Особенности конструкции транспортного модуля - манипулятора

Транспортный модуль предназначен для перемещения подложек по различным операциям в ходе работы установки согласно заданной программе. Был выполнен анализ возможных конструкций манипуляторов, используемых для решения этой задачи [1 ÷ 6, 40 ÷ 47, 65]. В ходе работы на основании анализа наиболее перспективных конструкций был изготовлен ряд опытных образцов транспортных модулей – манипуляторов, варианты которых представлены на рисунках 2.10 – 2.13.

Каждый из манипуляторов на рисунках 2.10– 2.12 содержит корпус, в котором объединено различное число звеньев, имеющих свой индивидуальный привод. Каждое звено манипулятора может совершать линейное или вращательное движение, причем как совместно, так и поочерёдно. К числу недостатков всех манипуляторов следует отнести громоздкость их конструкции.

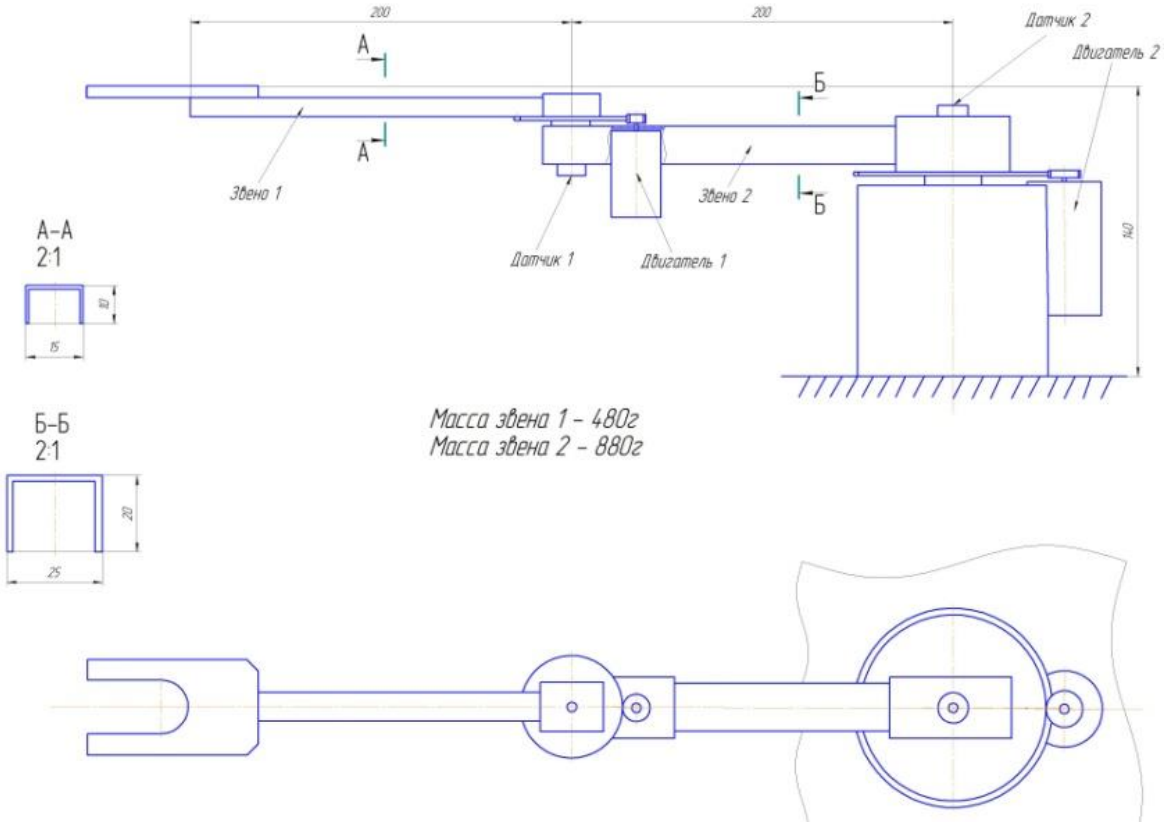


Рисунок 2.10 – Транспортный модуль – манипулятор М1

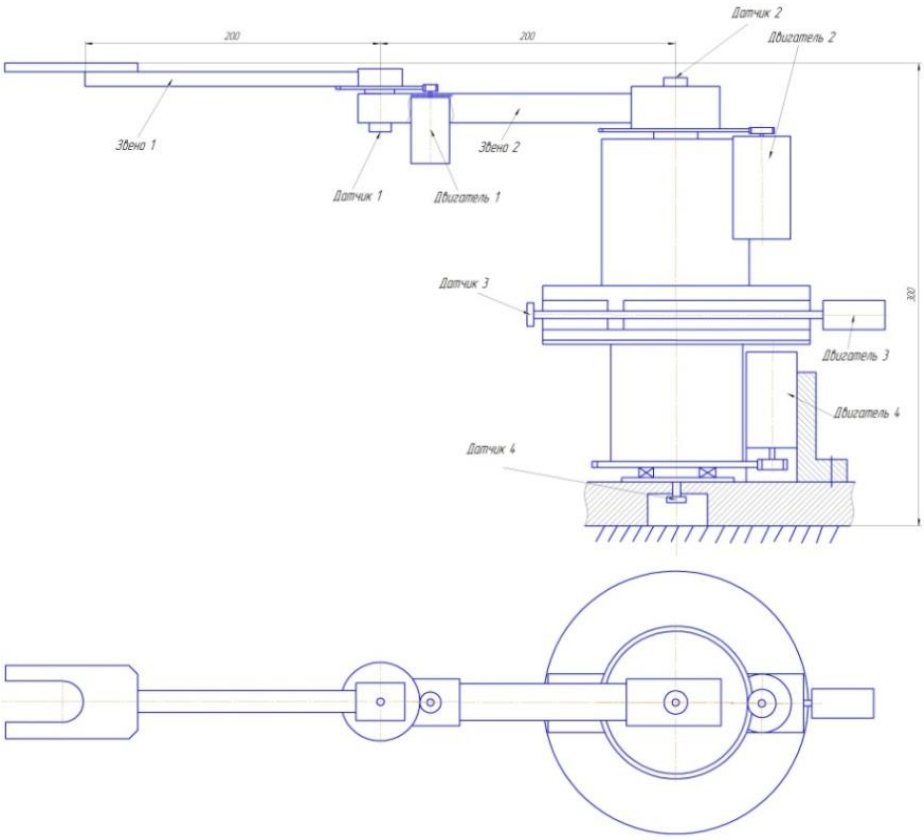


Рисунок 2.11 – Транспортный модуль – манипулятор М2

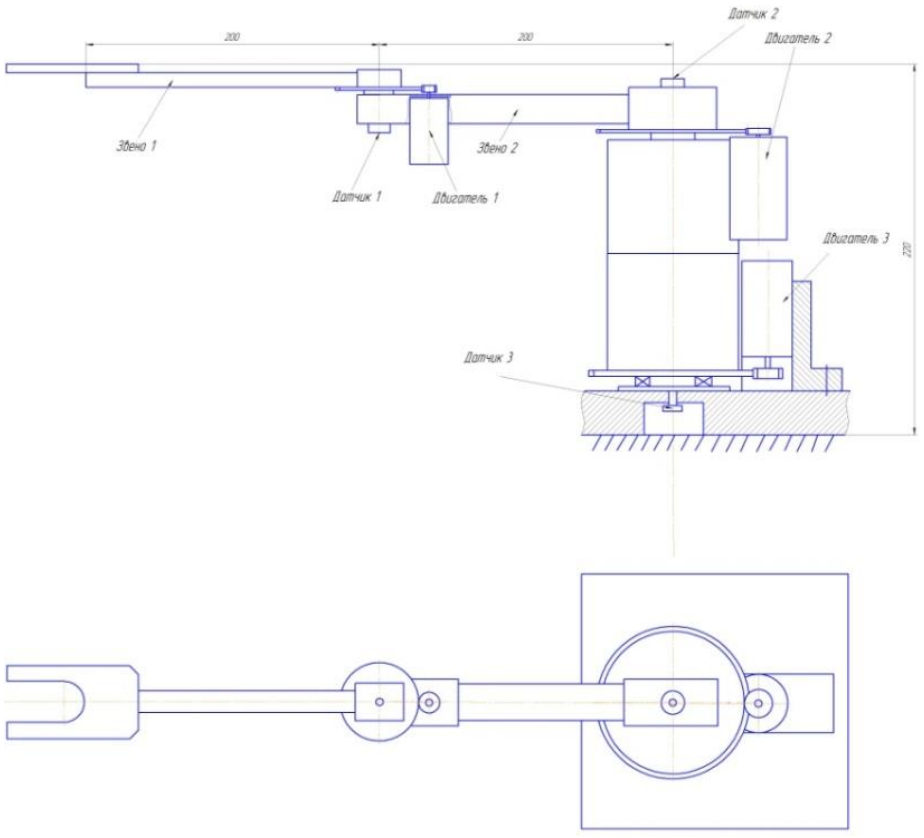


Рисунок 2.12– Транспортный модуль – манипулятор М3

В результате, по критериям наработки на отказ и массо-габаритным показателям была выбрана конструкция транспортного модуля, показанная на рисунках 2.13 и 2.14.

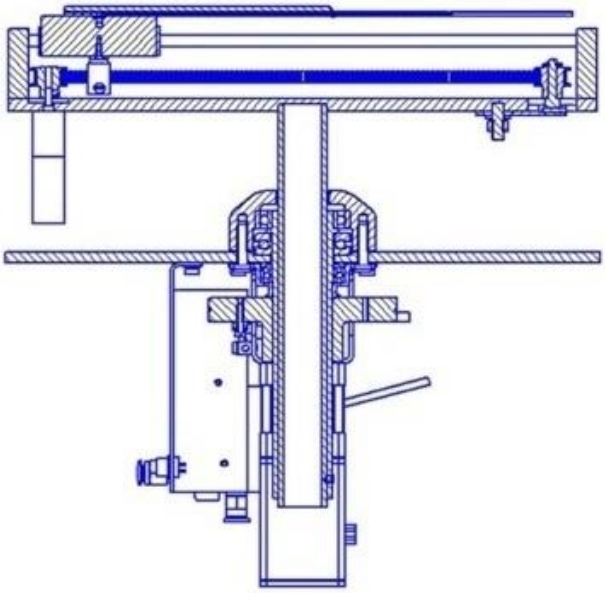


Рисунок 2.13 –Транспортный модуль – манипулятор М4

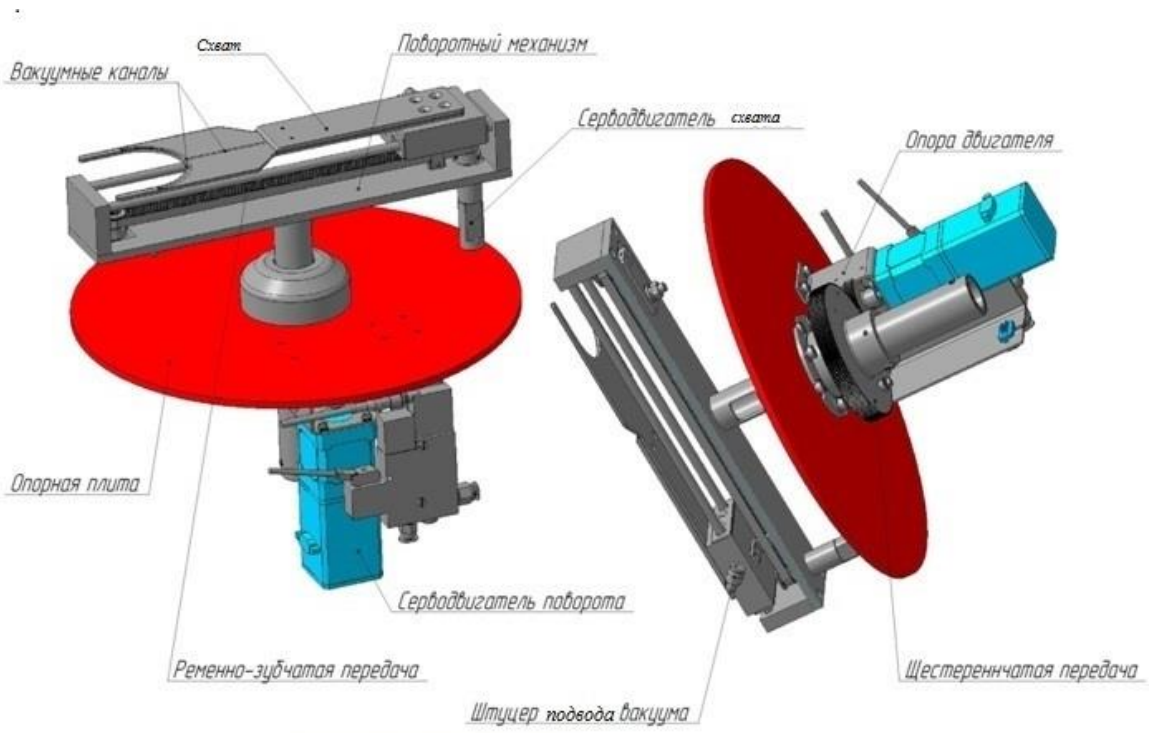


Рисунок 2.14 –Транспортный модуль – манипулятор М4

Манипулятор содержит рабочий орган – схват специальной формы с вакуумным каналом для удержания полупроводниковых пластин. Схват установлен на рабочем звене с возможностью горизонтального перемещения с помощью исполнительного двигателя через зубчатую ременную передачу. Рабочее звено установлено с возможностью поворота на 360 ˚ от второго исполнительного двигателя, соединённого с ним при помощи шестеренчатой передачи. Сам манипулятор собран на опорной плите, которая крепится к корпусу установки. На плите установлены датчики и концевые выключатели, которые связаны с исполнительными двигателями. Разработанное ПО позволяет поворачивать манипулятор, выдвигать схват, а также включать или выключать вакуум [7].

Модуль инструмента и система дозирования фоторезиста

Модуль инструмента содержит механизм поворота инструмента, который обеспечивает поворот технологического инструмента в рабочее положение и возврат его в исходное положение, а также динамический режим с радиальным сканированием подающего сопла, который осуществляется от серводвигателя через зубчатую передачу. Данный модуль представлен на рисунке 2.15.

Механизм подъема обеспечивает подъем и опускание инструмента дозирования при помощи пневмоцилиндра. Верхнее и нижнее положение технологического инструмента контролируется датчиками положения, закреплёнными на пневмоцилиндре.

В нерабочем положении инструмент отводится в зону «парковки», в этом случае подающее фоторезист сопло находится внутри сливной ёмкости, во избежание попадания капель фоторезиста на поверхность установки, также в этом положении можно прокачать подающую систему трубок от воздушных пузырей и остатков полимеризовавшегося фоторезиста при длительном простое установки.

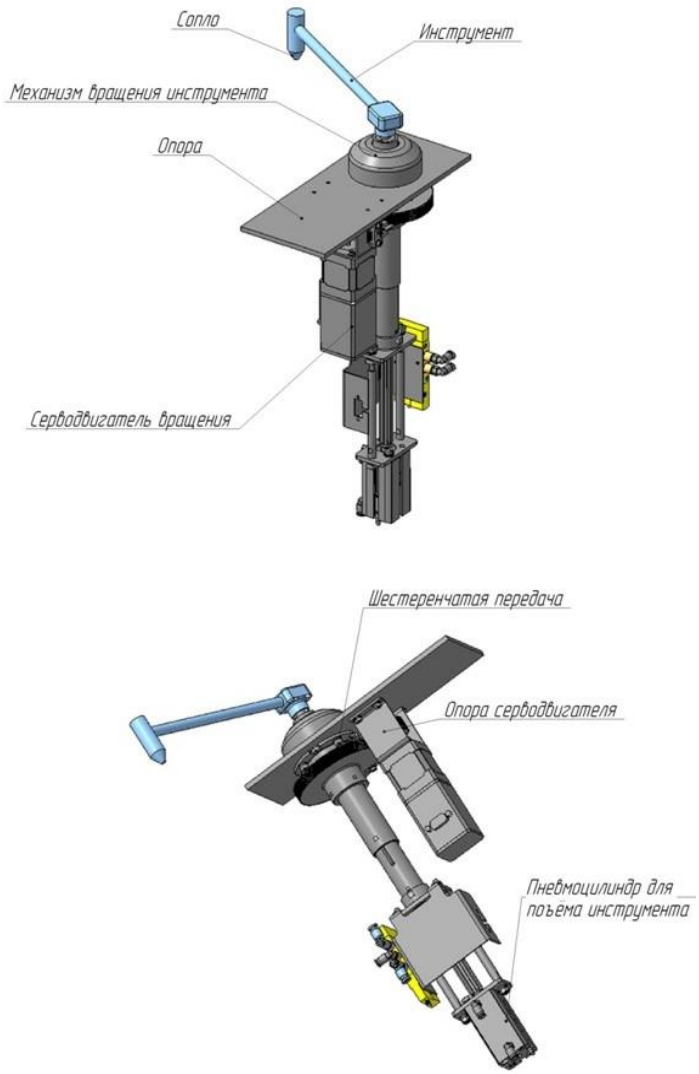


Рисунок 2.15 – Модуль инструмента

Для очистки подающей системы (трубки, клапан, сопло), в герметичную ёмкость, вместо фоторезиста устанавливается промывочный раствор, подается давление и открытием пневмоклапана системы «Nordson» производится промывка. В данном случае пневмоклапан можно открыть как командой с промышленного компьютера, так и вручную. Слив отработанной жидкости производится в полиэтиленовую ёмкость, расположенную внутри установки.

Температура фоторезиста и подложки перед нанесением фоторезиста должны быть приведены к равновесному состоянию с окружающей средой.

В установке используется система дозирования компании «Nordson», состоящая из пневмоклапана и микроконтроллера, который срабатывает по сигналу, задаваемому с промышленного компьютера.

В герметичную ёмкость устанавливается бутыль с фоторезистом и подаётся воздух для создания давления. Величина давления выставляется на манометре с регулятором давления (4÷5)Bar. Фоторезист через ёмкость нагрева (теплообменник) подаётся через систему дозирования на модуль инструмента, затем на обрабатываемую подложку. Нагрев и поддержание температуры фоторезиста осуществляется при помощи термостата.

Особенности конструкции модулей термообработки и термостабилизации

В ходе полимеризации плёнки фоторезиста повышается его адгезия к пластине и устойчивость к воздействию на неё кислот, при повышенных температурах в слое фоторезиста затягиваются мелкие отверстия, поры, дефекты. Сушка осуществляется на горячей плите. Так как кремний является хорошим проводником тепла, то равновесная температура достигается уже примерно через 10 сек. Приемлемые условия сушки на горячей плите – это 110 ^{o}C в течение 45 сек. Данный модуль приведён на рисунке 2.16.

Модуль содержит алюминиевую анодированную плиту с отфрезерованной с внутренней стороны полостью, в которую установлен нагревательный элемент, центральным отверстием и тремя канавками, расположенными под углом 120° для подачи вакуума, а также тремя сквозными отверстиями, через которые двигаются стальные иглы с керамическими наконечниками, предназначенные для подъема и опускания обрабатываемых подложек. В нижней части плиты установлен штуцер для подачи вакуума, а также расположено отверстие, в котором закреплена термопара.

В резистивных нагревателях с тепловой подачей от проволоки высокого сопротивления с миканитовой (или слюдяной) изоляцией гарантируется

отведение высоких температур, которые появляются в рабочем режиме, и при этом высокоэффективная теплопередача.

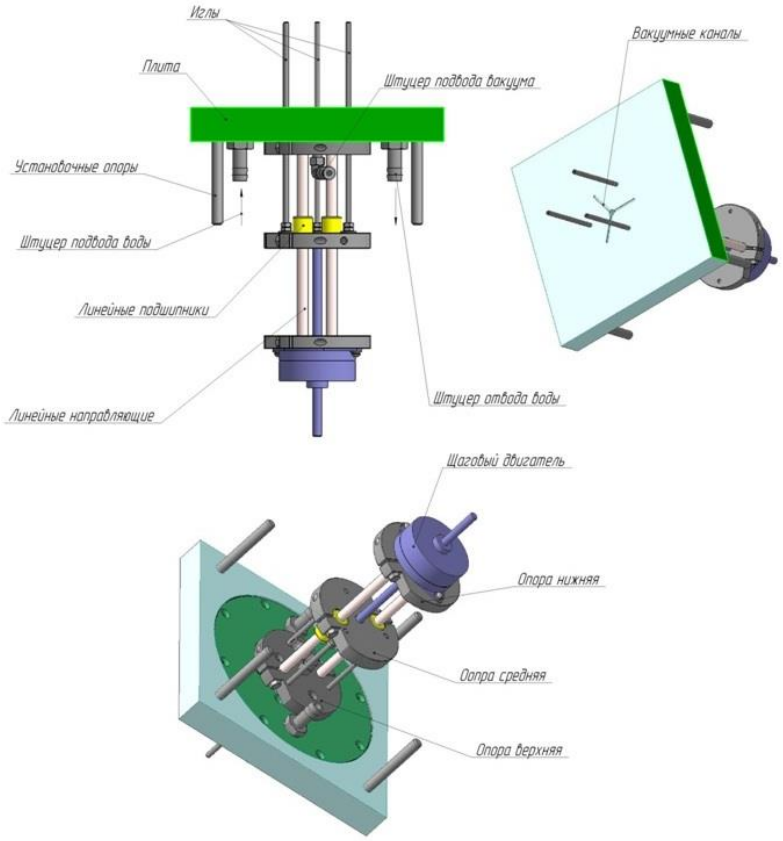


Рисунок 2.16 – Модуль термообработки

Основной перечень конструкции рассматриваемого модуля:

– корпус – изготовлен из нержавеющей стали, обладающей диэлектрическими свойствами. Толщина оболочки нагревателя составляет 0,5мм. Конструктивное исполнение – квадрат;

– изоляционный слой – изоляция состоит из листовой слюды, которая размещается внутри защитного корпуса;

– резистивный элемент – выполнен из проволоки и предназначается для непосредственной выработки тепловой энергии. Конструктивно располагается во внутренней части нагревательного прибора вместе с миканитовым изолятором;

– механизм подъема и опускания игл состоит из трех опорных элементов, где верхняя опора непосредственно крепится к нагревательной плите через втулки из текстолита(для изоляции от горячей поверхности).

Нижняя опора неподвижна и соединена с верхней опорой тремя линейными направляющими. С нижнего торца на ней закреплен шаговый двигатель, а с верхнего – концевой выключатель.

Средняя опора подвижна и может перемещаться между крайними опорами по направляющим через линейные подшипники за счет вала шагового двигателя. На средней опоре установлен исполнительный механизм, состоящий из трех игл, которые показаны на рисунке 2.16.

Модуль термостабилизации содержит:

- алюминиевую анодированную плиту с отфрезерованной с внутренней стороны полостью, которая с нижней стороны герметично закрыта крышкой.

В крышке установлены два штуцера, служащих для подвода и отвода технической воды, то есть охлаждение алюминиевой плиты осуществляется протоком холодной магистральной воды через внутреннюю полость плиты.

Механизм подъема и опускания игл выполнен аналогично тому, как на модуле термической сушки (задубливания) фоторезиста.

Особенности конструкции модуля лифта загрузки подложек

Загрузочный модуль состоит из алюминиевой анодированной плиты, на которой расположены фторопластовые упоры для кассеты с концевым выключателем, позволяющим программе управления определять наличие или отсутствие на нем кассеты; плита имеет возможность вертикального перемещения по направляющим, посредством линейного шагового двигателя, закрепленного на каркасе установки. Вид загрузочного модуля представлен на рисунке 2.17.

В состав установки входят два таких модуля. В первый модуль устанавливаются стандартные фторопластовые кассеты размером 6 или 8 ″ на 25 кремниевых пластин (подложек) диаметром, соответственно,150 и 200 мм с

установленными в них подложками, подготовленными к операции нанесения фоторезиста. Второй модуль предназначен для этих же подложек, но уже прошедших операции нанесения фоторезиста, термообработки и термостабилизации.

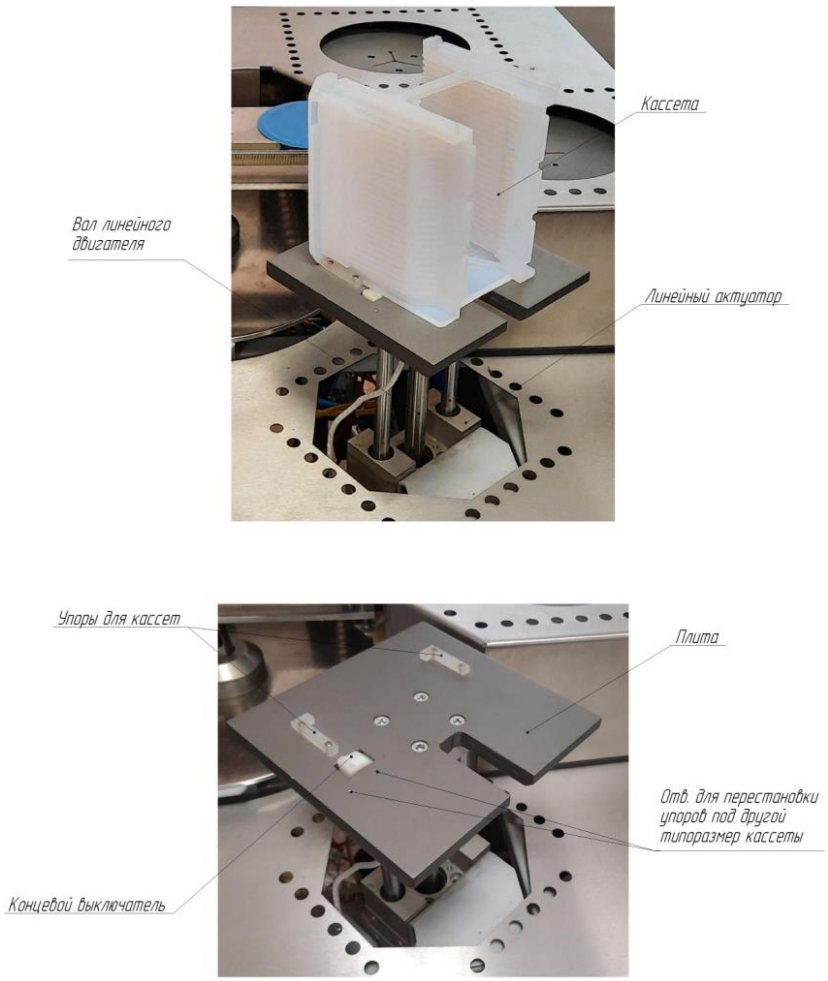


Рисунок 2.17 – Загрузочный модуль

Таким образом, установив кассету с подложками на загрузочный модуль, после автоматической обработки, со второго модуля снимаем кассету с термообработанными и термостабилизированными подложками, на рабочую поверхность которых нанесён фоторезист, полностью готовыми к следующей операции фотолитографии – совмещению и экспонированию. Величина вертикального перемещения задаётся программно в соответствии с шагом между

подложками, установленными в кассете. Установка может работать в автоматическом режиме с количеством кремниевых подложек (1÷25) шт.

2.5. Выводы по главе 2

Опираясь на многолетний опыт по разработке, обслуживанию, использованию, ремонту автоматизированных установок нанесения фоторезиста приведены рекомендации, которые подробно описывают все нюансы при разработке подобного оборудования, сформулированы и приведены рекомендации по проектированию автоматизированных установок рассматриваемого типа, имеющие, по мнению автора, большую практическую ценность.

К автоматизированным установкам нанесения фоторезиста в кластерном конструктивном исполнении предъявляются требования, которые способствуют достижению необходимой толщины и равномерности нанесения фоторезистивных масок. Для того, чтобы им соответствовать, придётся учитывать и внешние факторы. Ведь на поверхность пластины влияют и они тоже. Эти факторы характеризуются такими параметрами, как температура окружающей среды, приращение температуры, влажность, приращение влажности, воздушный поток, чистота помещения. Поэтому предъявляются требования по контролю и за ними, которые необходимо соблюдать.

К горячим плитам для термообработки пластин предъявляются особые отдельные требования, так как такие плиты способны нести несколько различных функций и быть ориентированы на различные процессы. К тому же нужен контроль над временем и температурой сушки пленки фоторезиста.

Рассмотрен и подробно описан состав установки нанесения фоторезиста УНФ-200А, который состоит из таких модулей, как модули загрузки/приёмки пластин, транспортный модуль – манипулятор, центрифугирования, инструмента дозирования фоторезиста, подогрева фоторезиста, термообработки, термостабилизации, а также имеется система управления установкой и защитный

бокс. Был проделан определенный объем работы по решению автором следующих задач:

- разработка новой конструкции узла подачи вакуума на ротор центрифуги, минуя вал двигателя, обеспечивающей высокий ресурс работы, а также пониженный уровень потерь на трение и потерь вакуума в системе ротора;

- разработка конструкции модуля термообработки с высоким ресурсом работы, зависящим от комбинации теплопроводящих и электроизолирующих свойств применённых материалов, а также обладающего сравнительно низкой инерционностью процесса нагрева, зависящей от конструкции нагревательного элемента.

ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЦЕНТРИФУГИ

3.1. Методика алгоритма построения быстродействующего микропроцессорного регулятора системы автоматического управления центрифуги

Требуемый закон изменения выходной величины системы автоматического управления часто определяется свойствами регулятора, выбор которого определяющим образом влияет на качество технологического процесса и основные потребительские характеристики автоматизированного оборудования [7, 11]. При этом следует подчеркнуть, что регулятор должен обладать одновременно высоким быстродействием и высокой точностью отработки установленного закона управления.

Задача аппроксимации (или интерполяции) функций изменения технологических параметров часто встречается в тех случаях, когда имеются стесняющие обстоятельства по проведению полноценных экспериментов. Причиной может быть бюджет или трудоемкость проведения эксперимента, тогда размер выборки (x_0, x_1, x_2,..., x_n) может быть достаточно мал. Бывает так, что аналитическое выражение функции y(x) не известно и получить его по таблице значений функции в ряде случаев нет возможности. Поэтому вместо функции изменения технологического параметра f(x) строят другую функцию, которая может быть вычислена и построена на той же таблице значений (совпадает с f(x) в точках x_0, x_1, x_2,..., x_n) [22].

Для снятия экспериментальной характеристики разгона центрифуги использовался оптический энкодер E20S2-100-3-N-5-R A2500002005 [125]. Энкодер имеет корпус диаметром 20 мм, выходной вал диаметром 2 мм, коэффициент передачи 100 имп./об. и выходной сигнал 5 В=, ±5%.

Для фиксации показаний использовался макет цифровой индикации на контроллере ArduinoUno с программой фиксирующих длительность интервала между двумя входными импульсами в определенные промежутки времени.

Для каждого времени внутри интервала пусковой характеристики было проведено несколько измерений. В результате измерений не было отмечено некорродирующих выбросов показаний.

Для получения функций, описывающих линейный закон скорости центрифуги, использовался метод линейной аппроксимации, а именно метод наименьших квадратов [8].

После проведения серии экспериментов, полученные результаты занесли в таблицу 3.1. Затем была сформулирована задача по отысканию приближенной функциональной зависимости скорости центрифуги от времени и расчёту значений параметров аппроксимирующей функции.

Таблица 3.1 - Экспериментальные данные

(ускорение центрифуги 10000 рад / $с^2$)											
X_1, мс	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
Y_1, об/мин	0	786	1876	3126	3800	4965	6150	7023	7784	8870	9980

Решаем задачу по определению эмпирической формулы аналитического выражения функции, описывающей закон изменения y_i (i = 1, 2, …, n), значения которой при $x = x_i$ мало отличаются от опытных данных.

Геометрически задача построения функции f(x) по эмпирической формуле состоит в проведении усредненной кривой – кривой, проходящей через середину области значений (табл. 3.1, рис. 3.1).

Для получения зависимости определенного вида отметим точки, экспериментально полученные, на графике (рис.3.1- «Ряд 1»).

Причины, являющиеся определяющими выбор в сторону аппроксимации, а не интерполяции, следующие [22, 61, 62]:

- интерполирующая функция становится громоздкой при весомом количестве табличных данных;

- при повторении эксперимента в одних и тех же начальных условиях интерполирующей функцией не возможно описать данные (нужна дополнительная статистическая обработка для уменьшения погрешностей экспериментов);

- данные x_i и y_i обычно содержат ошибки, поэтому интерполяционная формула дублирует данные ошибки.

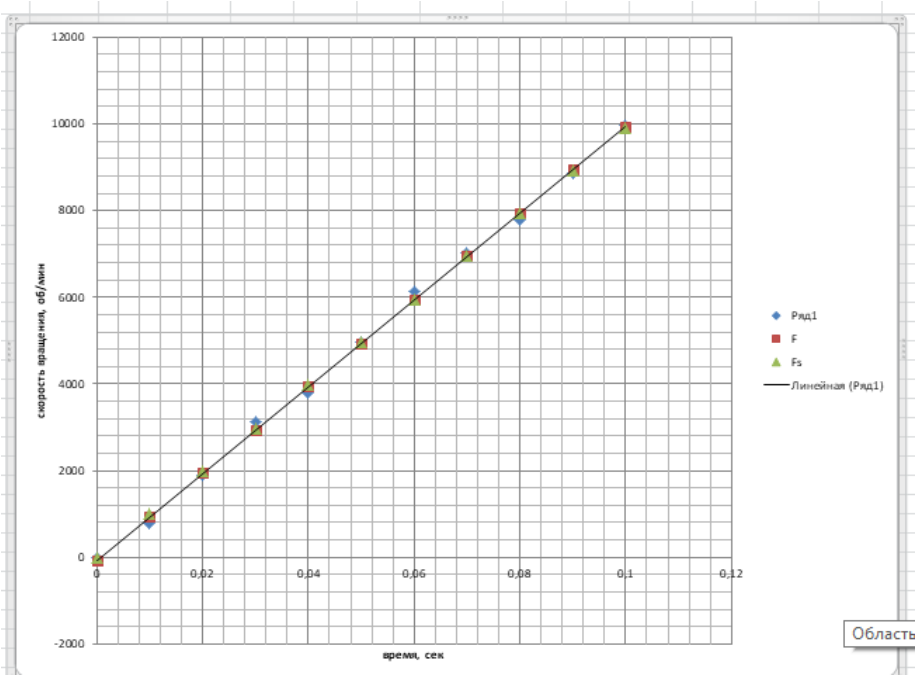


Рисунок 3.1 – Вид аппроксимирующей функции
(ускорение центрифуги 10000 рад / $с^2$)

При построении аппроксимирующей зависимости определим:

- аналитический вид эмпирической формулы;

- оптимальные величины эмпирической зависимости.

Воспользуемся методом линейной аппроксимации.

По построенному графику (рис.3.1- F) видно, что в качестве аппроксимирующей функции может выступать многочлен первой степени [22].

Строим линейную модель по формуле (3.1), способную описывать наблюдаемые показатели:

$$f = a\text{x} + b \tag{3.1}$$

Применяя метод наименьших квадратов, вычислим значения коэффициентов аппроксимирующей функции: a и b. Введём следующие обозначения для вычислений.

Сумма квадратов отклонений запишется следующим образом:

$$S = S(a,b) = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} [\varphi(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^{n} (ax_i + b - y_i)^2 \to min \tag{3.2}$$

Для нахождения a и b необходимо найти минимум функции $S(a,b)$. Необходимое условие существования минимума для функции S:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S}{\partial a} = 0, \\ \dfrac{\partial S}{\partial b} = 0, \end{cases} \tag{3.3}$$

или

$$\begin{cases} 2\sum\limits_{i=1}^{n} (ax_i + b - y_i)x_i = 0, \\ 2\sum\limits_{i=1}^{n} (ax_i + b - y_i) = 0. \end{cases} \tag{3.4}$$

Преобразуем систему (3.4):

$$\begin{cases} a\sum_{i=1}^{n} x_i{}^2 + b\sum_{i=1}^{n} x_i = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i\,, \\ a\sum_{i=1}^{n} x_i + bn = \sum_{i=1}^{n} y_i\,. \end{cases} \quad (3.5)$$

Добавим обозначения:

$$SX = \sum_{i=1}^{n} x_i\,, SXX = \sum_{i=1}^{n} x_i{}^2\,, SY = \sum_{i=1}^{n} y_i\,, SXY = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i. \quad (3.6)$$

Получим систему уравнений для нахождения параметров a и b:

$$\begin{cases} aSXX + bSX = SXY, \\ aSX + bn = SY. \end{cases} \quad (3.7)$$

Из системы (3.7) выразим параметры a и b:

$$a = \frac{SXY \cdot n - SX \cdot SY}{SXX \cdot n - SX \cdot SX}, b = \frac{SXX \cdot SY - SX \cdot SXY}{SXX \cdot n - SX \cdot SX}. \quad (3.8)$$

Система уравнений (3.7) определяющая параметры a и b для серии экспериментов при ускорении центрифуги 10000 рад / с^2 запишется:

0,0385a + 0,55 b = 3819,04

0,55a + 11 b = 54360

Решая данную систему, определим коэффициенты:

a = 100094,55

b = -62,91

Проведём проверку правильности выбора линейной модели (f_1). Вычислим значения аппроксимирующей функции**,** f_1= 100009455·x – 62,91 и занесём эти значения в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Результаты вычислений

ускорение центрифуги 10000 рад / $с^2$											
X_1	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
Y_1	0	786	1876	3126	3800	4965	6150	7023	7784	8870	9980
$F_1=ax+b$	-62.9	938.0	1938.9	2939.9	3940.8	4941.8	5942.7	6943.7	7944.6	8945.6	9946.5
ε_i	62.9	-152.0	-62.9	186.0	-140.8	23.1	207.2	79.2	-160.6	-75.6	33.4

По результата таблицы можно сделать вывод, что значения аппроксимирующей функции хорошо коррелируют с Y для всех точек X. Построим график аппроксимирующей функции (см. рис.3.1 - Fs).

На основе полученных данных построим переходные характеристики (рис. 3.2).Для синтеза управляющего сигнала, обеспечивающего желаемую скоростную характеристику центрифуги необходимо получить эквивалентную передаточную функцию системы.

Для решения этой задачи воспользуемся пакетом System Identification Toolbox[94, 139]. Использование пакета базируется на знании дискретных параметрах входного и выходного сигналов, а также следующих блоков:

- Estimation Data– набор данных, который используется для идентификации объекта. В графическом интерфейсе это то же самое, что и Working Data;

- Validation Data– набор входных данных для идентификации объекта, из которого исключены недостоверные данные (шумы, постоянные и случайные составляющие и т.п.);

- Model Views– различные пути просмотра свойств модели (нули и полюса, переходный процесс, частотная характеристика и т.д.);

- Data Views– методы и инструменты просмотра и проверки достоверности данных, позволяющие исключить из рассмотрения точки, которые могут являться ошибочными (нетипичными), периодические всплески или провалы, не характерные для идентифицируемого объекта.

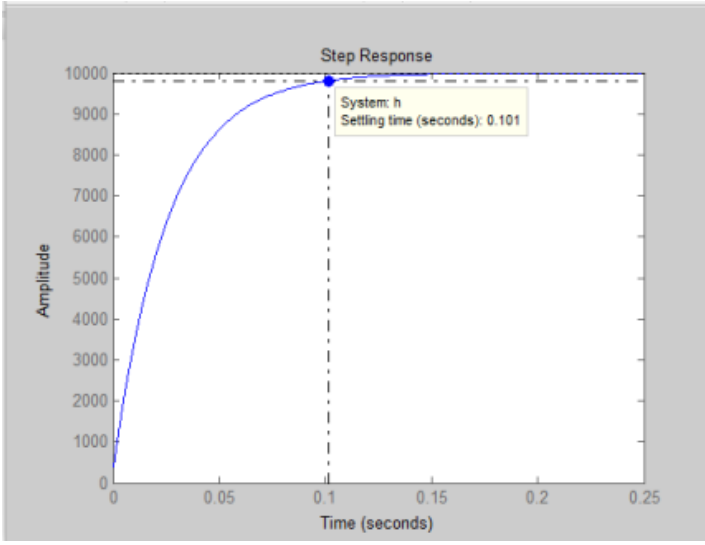


Рисунок 3.2 - Переходная характеристика центрифуги при $T_п$ = 100 мсек

Выходную дискретную характеристику модели получим с шагом дискретизации 0,0002 сна участке разгона (0 ÷ 0,1 с), входной сигнал зададим в виде единичной матрицы такого же размера

>>in=ones(501,1)

Импортируем полученные сигналы в System Identification Toolbox и выполняем расчет дискретной передаточной функции Estimate→Transfer Function Model (рис. 3.3).

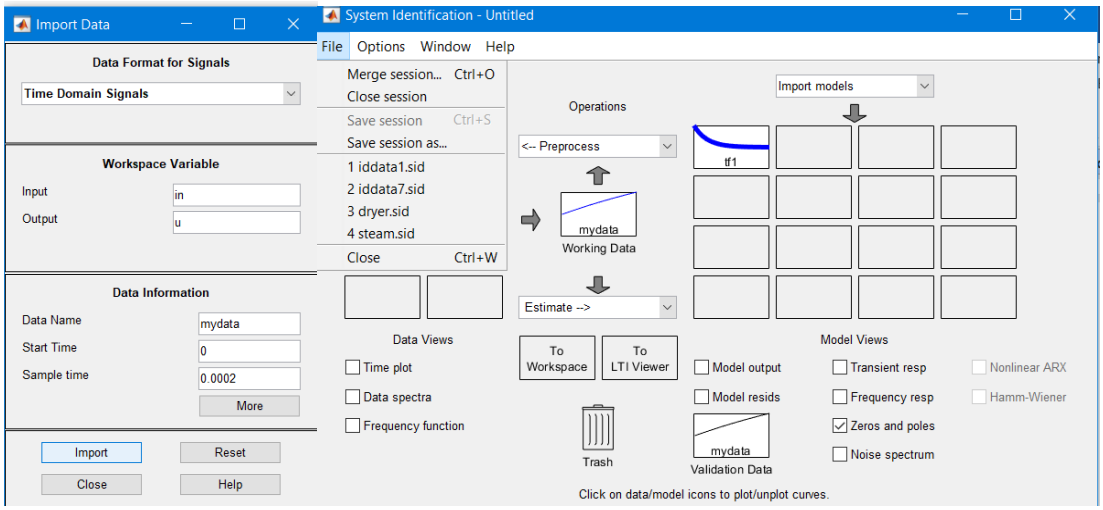


Рисунок 3.3 – Интерфейс System Identification Toolbox

Переходный процесс синтезированной системы вызывается флагом Transientresp

Передаточная функция при $T_п$ = 100 мсек:

```
>> [num,den] = tfdata(tf1)
num =
  1×1 cell array
    {[0.0135 13.5]}
den =
  1×1 cell array
    {[0.000035 0.00135]}
>>hob=tf(num,den)
hob =
0.0135 s + 13.5
  0.000035s + 0.00135
```

Передаточная функция при $T_п$ = 50 мсек:

```
>> [num,den] = tfdata(tf1)
num =
  1×1 cell array
    {[0.0135 13.5]}
den =
  1×1 cell array
    {[0.000015 0.00135]}
>>hob=tf(num,den)
hob =
0.0135 s + 13.5
  0.000015s + 0.00135
```

Аппаратная часть привода центрифуги выполнена в виде микропроцессорного привода с обратной связью по углу нагрузки, обеспечивающей постоянство рабочей скорости в установившемся режиме

работы. Во время разгона привода, который оказывает определяющее влияние на качество изделия, актуально требование постоянства ускорения.

Для требуемых толщины и равномерности наносимого на кремниевую пластину фоторезиста требуется обеспечить линейный разгон центрифуги до интервале ускорений 10000 рад/с^2 (см. рис. 3.4).

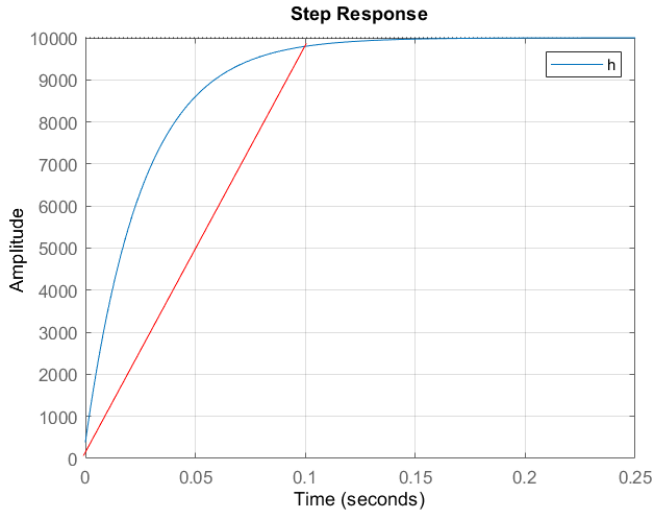


Рисунок 3.4 - Передаточная функция с линейным участком разгона центрифуги (участок характеристики с временным интервалом работы 0 ÷ 0,1 с)

Проектируем участок характеристики с временным интервалом работы 0 ÷ 0,1 с и функцией, которую рассчитали ранее $f_1 = 99195{,}84 \cdot t$(см. рис. 3.4).

Воспользуемся классическим методом прямого и обратного преобразования Лапласа, связывающего функцию комплексного переменного (*изображение*) с функцией вещественного переменного (*оригинал*) [93].

Используя пакет символьных вычислений Symbolic Math Toolbox определим набор необходимых для вычисления переменных [94]:

```
>>syms s t w sig
```

Определим изображение требуемого выходного сигнала

```
>>laplace(100000·t)
ans = 100000/s^2
```

Зная передаточную функцию, определим изображение требуемого сигнала управления на заданном временном интервале:

Определяем математическое выражение изображения входного сигнала.

Для этого разделим изображение выходного сигнала на выражение передаточной функции объекта управления

```
>> w=(100000/(s^2))/((0.0135*s+13.5)/(0.000035*s+0.00135))
w = (100000*((2582544170319337*s)/73786976294838206464 + 27/20000))/(s^2*((27*s)/2000 + 27/2))
```

Используя функцию обратного преобразования Лапласа[93], находим математическое выражение оригинала входной функции

```
>>sig=ilaplace(w)
sig = 10*t - (19397904315010198603 7*exp(-1000*t))/77822201560962170880 0 + 19397904315010198603 7/77822201560962170880 0
```

Определим вектор столбец времени работы управляющего сигнала

```
>>ts=0:0.0002:0.1;size(ts)
ans = 1 501
```

Рассчитаем значения управляющего сигнала в точках дискретизации:

```
>>sigd=10*t - (19397904315010198603 7*exp(-1000*t))/77822201560962170880 0 + 19397904315010198603 7/77822201560962170880 0
ans 1 501
```

Построим график управляющего сигнала(см. рис. 3.5):

```
>>figure(2),plot(ts,sigd),shg
```

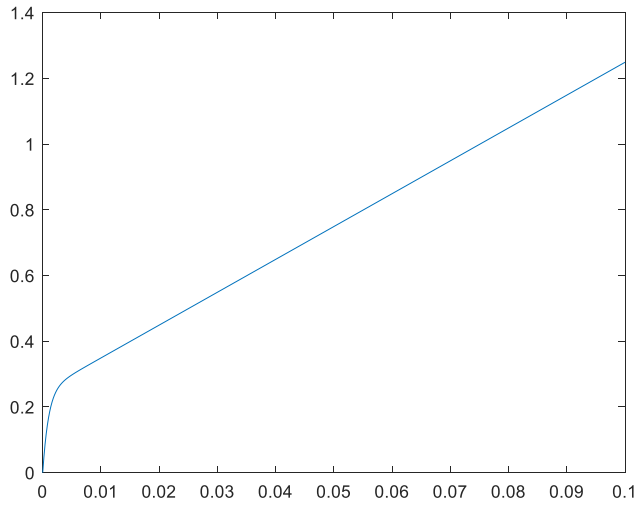


Рисунок 3.5 - График управляющего сигнала

Для проверки расчетов обратимся к функции lsim. Команда lsim(sys, u, t) предназначена для строительства графиков процессов для lti-модсли sys при входных воздействиях, заданных векторами t, u (рис. 3.6).

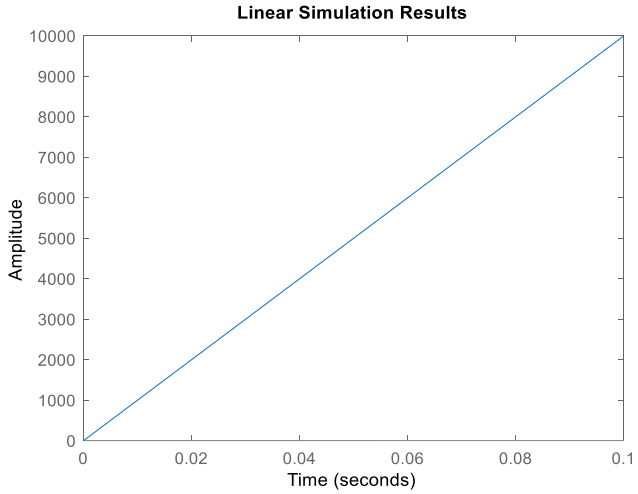


Рисунок 3.6 - График процесса для lti-модели sys при входных воздействиях

Вектор t=0:dt:TfinaI предназначен для задания интервала моделирования. Матрица u должна иметь число строк, равное длине интервала моделирования length(t), и число столбцов, равное числу входов. Каждая строка u(i, :) задает значения входного сигнала в момент времени t(i). Модель sys может быть

непрерывной и дискретной, одномерной и многомерной. Автозамена рассматриваемого параметра осуществляется тогда, когда значение dt достаточно велико и появляется вероятность вызвать скрытые колебания.

>>figure(3),lsim(hob,sigd',ts)

Таким образом, задача обеспечения пуска центрифуги с постоянным ускорением решена.

Особенности реализации полученного управляющего сигнала на микроконтроллере системы управления

И модель, и характеристики, полученные в результате моделирования, имеют шаг дискретизации по времени 0,0002 с. Это составляет 200 мкс. Использование встроенных в микроконтроллер таймеров, работающих на частоте 16 МГц и более, по критериям, изложенным в [14]), вполне достаточно для обеспечения требуемого уровня квантования по времени (реализации программно-управляемого режимаPWM).

Далее определимся с уровнями управляющего сигнала.

Расчетный массив имеет размер 501 точку дискретизации, что даже при уровне дискретизации 8 бит займет весьма большой (практически 0,5 Кбайта) объем памяти.

Попробуем алгоритмизировать процесс формирования управляющего сигнала и сделаем это при условии использования 8-разрядного таймера/счетчика, который имеет 255 уровней дискретизации сигнала.

Как видно из графика управляющего сигнала (рис. 3.5), на участке времени 0,01 ÷ 0,1 он имеет линейный характер. Найдем установившееся значение приращения используя разностную функцию на соответствующем временном участке:

>>diff(sigd(400:408))

ans =

Columns 1 through 8

0.0020 0.0020 0.0020 0.0020 0.0020 0.0020 0.0020 0.0020

Теперь найдём альтернативу начальному участку

Выделим участок сигнала в 0.02 с(рис. 3.7):

```
>>i=find(ts<0.02);size(i)
ans =
1    100
>>figure(2),plot(ts(i),sigd(i)),shg
```

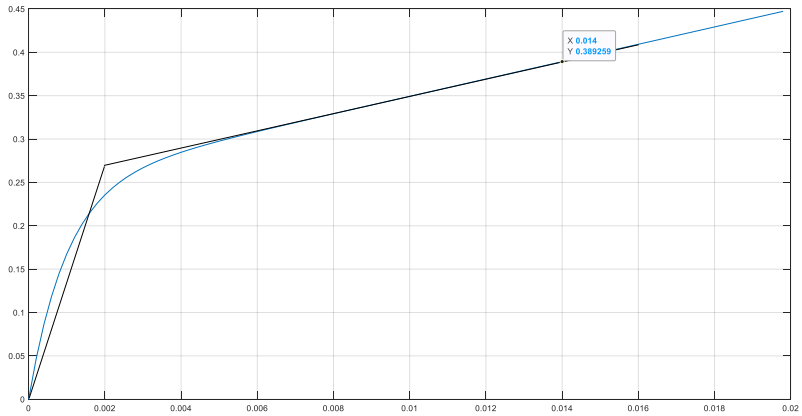


Рисунок 3.7 - График управляющего сигнала, разделенный на участки

Составим управляющий сигнал из двух линейных участков (рис. 3.8).

Для отрезка времени 0 ÷ 0,002с с приращением 0,029 и для остальной характеристики с приращением 0,002.

```
>>i=find(ts<=0.002);size(i)
ans =
1    11
>>sigm=zeros(1,501);
>>fori=2:11,sigm(i)=sigm(i-1)+0.029;end
>>fori=11:501,sigm(i)=sigm(i-1)+0.002;end
>>plot(sigm),grid on,shg
```

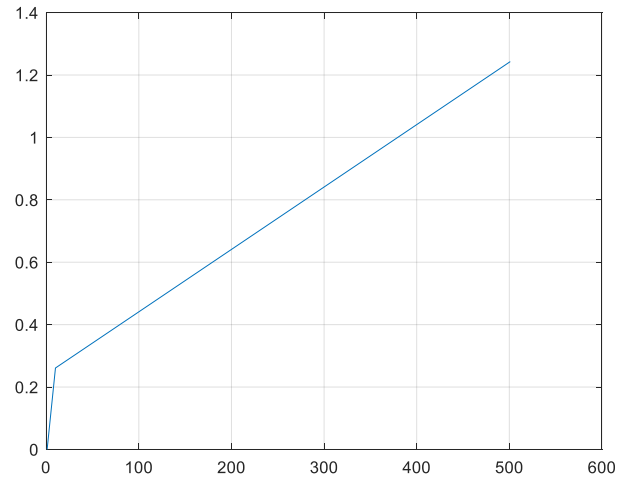


Рисунок 3.8 - Результирующий график преобразований

Посмотрим выходную характеристику при таком сигнале (рис. 3.9).

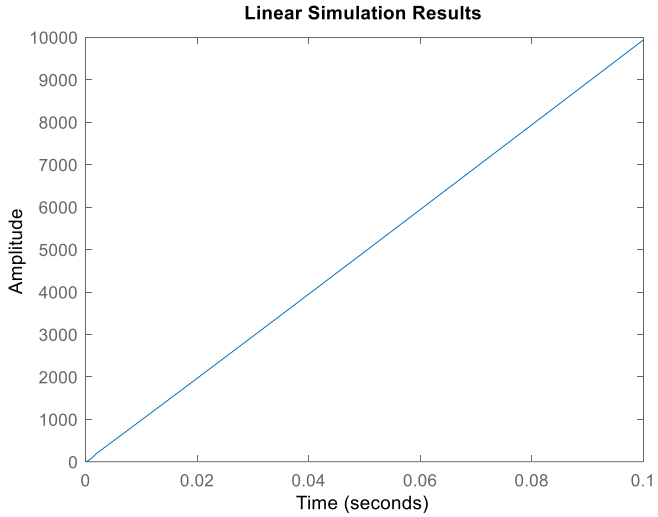


Рисунок 3.9 - Выходная характеристика при рассматриваемом сигнале

Выходная характеристика имеет те же параметры, что и исходная, следовательно, такая аппроксимация вполне применима.

$$sigm(1) = 0$$
$$sigm(2:11) = sigm(i-1) + 0.029$$
$$sigm(12:501) = sigm(i-1) + 0.002$$

Полученная характеристика выполнена с дискретизацией 0,0002 с. Следовательно, квантование управляющего сигнала по времени не влияет на качество работы системы.

Поскольку качество управляющего сигнала определяется не только величиной периода квантования во времени, но и разрешающей способностью формирователя ШИМ, следует определить величину нижней границы микропроцессорного ШИМ.

Проверим влияние квантования сигнала по амплитуде. Предположим, что мы используем восьмиразрядный ШИМ, имеющий 255 уровней выходного сигнала. Максимальный уровень управляющего сигнала – 1,24. Выполним моделирование прохождения сигнала управления через квантователи уровня и времени, чтобы сформировать модель цифрового управляющего сигнала [49].

Модель преобразователя состоит из блоков работы с переменными рабочей области, квантователя по уровню (Quantizer) с разрешением 1,24/255 и квантователя по времени (Zero-OrderHold) с периодом квантования 0,0002с (рис. 3.10).

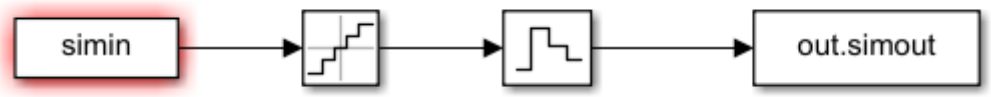


Рисунок 3.10 - Модель преобразователя

Время моделирования 0,1 секунды.

Получаем сигнал в виде out структуры.

Выделяем из структуры сигнала данные:

>> sig255=out.simout;

Эта переменная является переменной типа TimeSeries [125] со структуройEvents:

Name: ''

UserData: []

Data: [501×1 double]

DataInfo: [1×1 tsdata.datametadata]

Time: [501×1 double]

TimeInfo: [1×1 tsdata.timemetadata]

Quality: []

QualityInfo: [1×1 tsdata.qualmetadata]

IsTimeFirst: 1

TreatNaNasMissing: 1

Length: 501

Для моделирования работы системы необходимо извлечь из нее массив данных, а затем построить зависимость (рис. 3.11):

>> sig255m=sig255.Data;

>>figure(3),lsim(h,sig255m',ts)

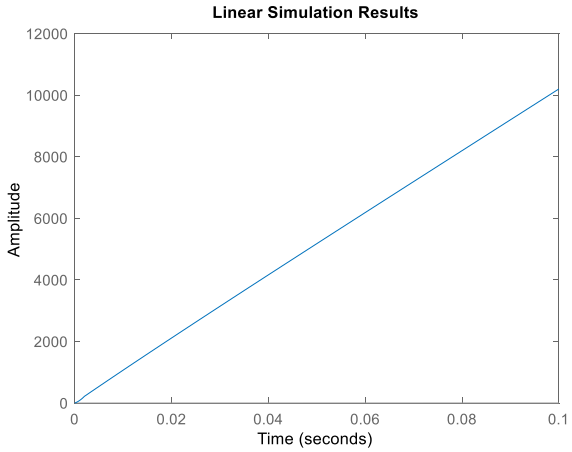


Рисунок 3.11 - График управляющего сигнала при моделировании

С учетом параметров формирования управляющего сигнала можно с уверенностью сказать, что реализация программного пуска системы с постоянным ускорением может быть выполнена на большинстве 8-разрядных микроконтроллеров.

Рассмотрим способ выхода в стационарный режим работы с постоянной скоростью. Необходимость такого анализа вызвана требованием к линейности закона управления и, одновременно, обеспечением высоких ускорений центрифуги. Для сохранения времени разгона на требуемом уровне, управляющий сигнал при подходе к точке выхода на стационарный режим работы вышел на уровень 1,24, что на 0,24 выше стационарного режима. Посмотрим, как будет выглядеть переход при скачкообразном сбросе уровня управляющего сигнала до номинального значения (рис. 3.12).

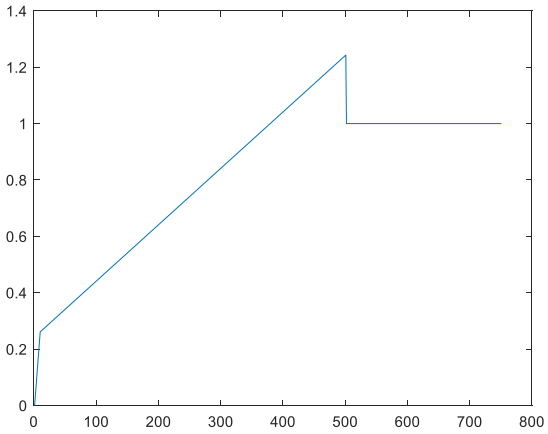


Рисунок 3.12 - Управляющий сигнал при скачкообразном сбросе уровня установившегося значения до номинального

Сначала увеличим временной интервал исследования до 0,15 секунд.

>>tsl=0:0.0002:0.15;size(tsl)

ans =

751

Таким образом, к массиву значения управляющего сигнала необходимо добавить 250 точек.

>>sigm=zeros(1,501);

>>sigml=[sigmdop];figure(1),plot(sigml),shg

Рассчитаем выходную характеристику (рис. 3.13).

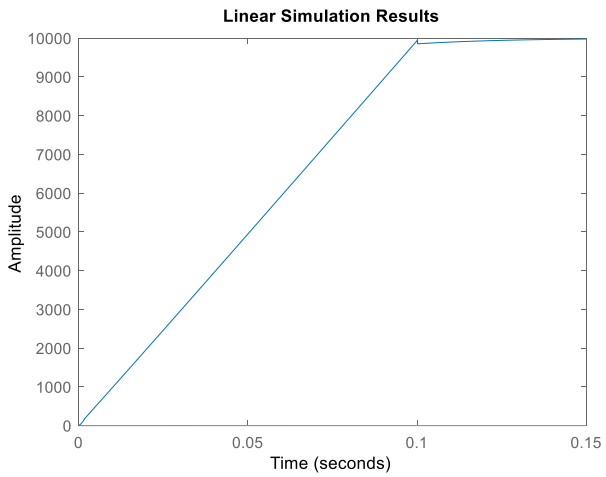


Рисунок 3.13 - Переходная характеристика при скачкообразном сбросе уровня управляющего сигнала

Как видно из результата (рис. 3.13), сброс уровня управляющего сигнала вызвал небольшой, но резкий спад скорости, что также недопустимо.

Введем в характеристику небольшой линейный спад управления:

>>dop(1)=1.24;for i=2:10,dop(i)=dop(i-1)-0.024;end

Посмотрим результирующую характеристику (рис. 3.14):

>>sigml=[sigmdop];figure(1),plot(sigml),shg

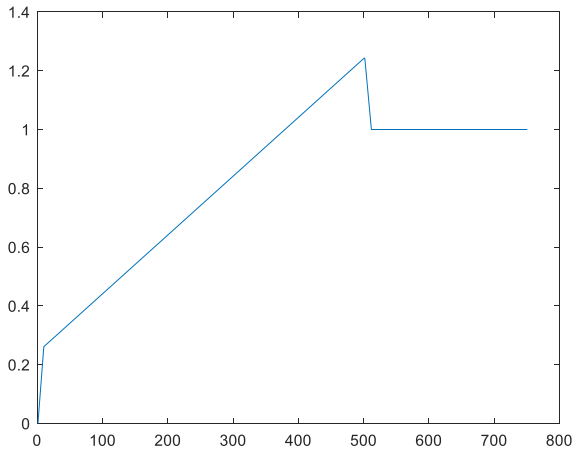
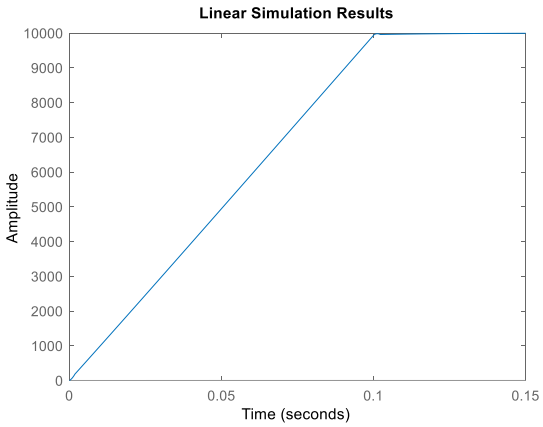
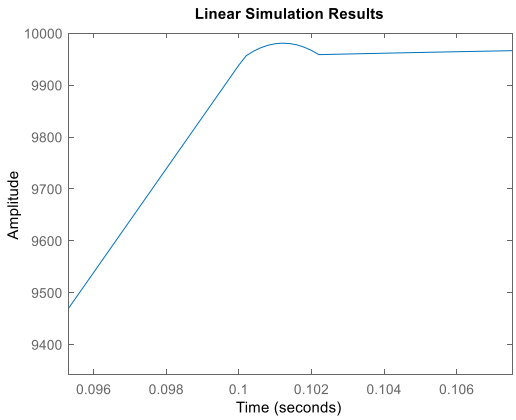


Рисунок 3.14 - Результирующая характеристика при линейном спаде

Выходной сигнал системы будет иметь вид (3.15):

>>figure(3),lsim(h,sigml',h1),shg





1) Полный вид характеристики 2) Увеличенный вид характеристики

Рисунок 3.15 - Переходный сигнал системы при данных условиях

Участок линейного спада управляющего сигнала вносит сглаживание в зону выхода на стационарный режим работы и, при необходимости, может быть скорректирован по длительности и амплитуде.

Высокая скорость переходного процесса пуска двигателя не позволяет внедрить в алгоритм управления пуском сколь-нибудь сложные законы управления, требующие серьезных логических или математических расчетов, но в стационарном режиме работы можно разработать ряд логических правил для выполнения функции поддержания скорости вращения. Их реализация не будет иметь строго математического описания, а больше напоминать некий логический регулятор.

Основные параметры, которые можно использовать для построения такого регулятора:

- фото-импульсный датчик имеющий разрешение 360 импульсов на оборот позволит измерять уровень скорости каждый цикл управления (0,002 секунды). Норма показания датчика составляет 120;
- уровень выходного (управляющего) сигнала имеет диапазон изменения от 0 до 1,25 (максимальные значения обеспечивают линейный разгон до рабочей скорости);
- величина колебаний показаний датчика скорости ±6 импульсов соответствует изменению скорости на ±500 об/мин;
- корректирующее воздействие на выходную величину составляет ±0,024.

Рассмотрим правила работы регулятора:

- в режиме разгона, до достижения датчиком скорости значения 120 импульсов за цикл не выполнять никаких действий;
- при достижении показаний датчика скорости 120 единиц начать отсчет 10 циклов для завершения процедуры выхода на рабочую скорость;
- по окончании второго этапа включается обратная связь привода по ускорению а также включается логический алгоритм, который работает по принципу ±6. Уменьшение показаний датчик за цикл на величину от 6 до 11

импульсов добавляет к управляющему сигналу величину 0,02 единицы (режим П1), уменьшение на 12 и более импульсов – режим П2 (+0,04 единицы). Увеличение скорости, если оно произойдет, выполнить противоположные действия (М1 и М2). С учетом длительности цикла управления такого алгоритма должно хватить на все возможные снижения, так как скорость переключения корректирующих действий гораздо выше скоростных возможностей установки.

Полный набор условий сведен в таблицу 3.3 .

Таблица 3.3 – Алгоритм работы адаптивного регулятора поддержания скорости вращения центрифуги

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td colspan="5">Показания датчика скорости за такт (0,002 с)</td></tr>
<tr><td><108</td><td><114</td><td>115:125</td><td>>126</td><td>>132</td></tr>
<tr><td>участок разгона</td><td colspan="5">не действий</td></tr>
<tr><td>достигнуто значение 120</td><td colspan="5">начать отсчет 10 тактов управления для выполнения выхода в стационарный режим</td></tr>
<tr><td rowspan="2">прошло 10 тактов</td><td colspan="5">включить обратную связь по ускорению</td></tr>
<tr><td>П2</td><td>П1</td><td>0</td><td>М1</td><td>М2</td></tr>
</table>

Таким образом, окончательно разработан простой, для микроконтроллерного исполнения, алгоритм формирования управляющего сигнала запуска объекта управления с функциями обеспечения постоянного ускорения и поддержания рабочей скорости.

Разработаны основы методики формирования адаптивного сигнала управления пуском привода центрифуги, обеспечивающего разгон привода с постоянным ускорением и поддержание установившейся скорости вращения, т.е. получили микропроцессорную реализацию управляющего сигнала пуска центрифуги с постоянным ускорением и поддержание установившейся скорости.

Для быстродействующих объектов [10, 12] при моделировании дискретного регулятора значение периода квантования по времени должно быть больше или равно значению времени выборки, которое указывается при вводе

величин в блоке дискретной трансфер-функции. При несоблюдении данного условия регулятор потеряет свои свойства [49].

В случае использования при моделировании дискретных регуляторов экстраполяторов нулевого порядка [49, 50] нужно указать значение периода квантования в задающей области экстраполятора, которое было указано у дискретного регулятора. Использование экстраполятора нулевого порядка сократит время на вычисления, которое тратилось на перевод линейного регулятора в дискретный, а также снимет необходимость вычислений с дискретностью микроконтроллера.

3.2. Выбор серводвигателя, аналогов электропривода центрифуги и современных методов управления с целью обеспечения требуемых динамических и ресурсных свойств

В качестве серводвигателя центрифуги выбран бесконтактный двигатель (БД), в котором возбуждение осуществляется расположенными на роторе постоянными магнитами (ПМ), а коммутация обмоток – силовыми транзисторами по сигналам датчика положения [9, 120, 129]. За сравнительно короткий срок своего развития БДПМ стали основными двигателями электроприводов автоматических устройств.

Сегодня ведущие зарубежные и российские электротехнические фирмы освоили выпуск промышленных электроприводов на основе БДПМ. Это обусловлено сокращением стоимости высококоэрцетивных постоянных магнитов «неодим-железо-бор» (Nd-Fe-B), «самарий – кобальт» (SmCo5), появлением интеллектуальных сборок силовых инверторов, а также высокоресурсных оптических энкодеров с дискретностью до $32 \cdot 10^3$ о.е./об.

Аналоги электропривода центрифуги (ЭПЦ) автоматизированной установки нанесения фоторезиста приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Сравнительные характеристики аналогов ЭПЦ

Наименование параметра	Критерий качества изделия			
	«Siemens» Simovert	«Eubert» 2013 г.	«Rockwell Automation»Ulira 2015г.	ДБ50-300-10--48-IM3681--С28-Р16-Д15 Россия
Исполнительный механизм, способ возбуждения	БД, магнит	БД, магнит	БД, магнит	БД, магнит
Вид управления	цифровой	цифровой	цифровой	цифровой
Диапазон регулирования ошибка, %	30000 0,01	30000 0,01	20000 0,01	10000 0,01
Режим позиционирования с дискретностью, угл. мин	15	15	30	108
Режим автоматической диагностики	МП	МП	ОС Windows	МП

В частности, электропривод модели Simovert с цифровой системой управления с 16-разрядным микропроцессором и инвертором SIMPOS представляет фирма «Siemens».

Электропривод фирмы «Eubert» использует трехконтурную систему управления: тока, скорости и положения.

Электроприводы моделей Ultra фирмы «Rockwell Automation» реализуют цифровую концепцию оборудования с автоматической настройкой на параметры выбранного исполнительного механизма и развитой системой диагностики на базе операционной системы Windows.

Специалистами МЭИ разработан электропривод с высокими техническими показателями, реализованный на базе цифрового сигнального микроконтроллера ADMC-300 фирмы «AnalogDevices», аналог которого выпускается в КНР.

В идеальном выражении полнота управляемости ЭПЦ регламентируется эффективностью его регулирующих воздействий на электромагнитный момент исполнительного механизма через координаты векторов, описывающих

динамические процессы. Наиболее общее представление «векторного управления» фокусируется вектором напряжения статора через задание его амплитудо-фазо-частотной характеристики.

Такой множественный уровень реализации функциональных и конструктивно завершенных электроприводов исследователи представляют по четырём иерархическим составляющим, в которых первый – «кибернетический» критерий предполагает два раздельных подхода: информационный (устойчивость, качество переходного процесса и такие функции как частотная и импульсная характеристики) и энергетический (токи, напряжения, мощность, механические – рабочие – теплофизические и др. характеристики) – с единством аспектов проблематики на основе анализа по методу результирующего вектора [19, 23, 58] в системе координат, жестко связанной с основным магнитным потоком, который переносит энергию из электронной части системы в электромеханическую.

Классификация видов классического и интеллектуального [58] управления в соответствии с рисунком 3.16 даёт критическое представление о современных подходах в создании электроприводов.

Отмечая рациональность классического управления электропривода по отклонению с параллельной и последовательной коррекциями или подчиненного с контурами момента и скорости требуется отметить, что при негармоническом законе приложения нагрузки их эффективность недостаточна, что вынуждает использовать, например, модальное управление с замыканием по вектору состояния объекта через датчики или наблюдатели.

Анализ и синтез ЭПЦ с оптимизированными эксплуатационно - техническими характеристиками предполагает использование системного подхода, при котором одновременно рассматриваются различные аспекты, относящиеся к разным уровням обобщения системы. Анализируя степени обобщения, можно выделить четыре иерархических уровня [21], которые позволяют комплексно проводить исследования систем. Это кибернетический, физический, функциональный и конструктивный уровни.

Рисунок 3.16 - Способы управления ЭПЦ на разных уровнях

В целом алгоритмы управления ЭПЦ на базе БДПМ можно разделить на два иерархических уровня: первый позволяет формировать сигналы управления в фазных обмотках двигателя в функции угла датчика положения ротора [17, 107]; второй – обеспечить заданные статистические и динамические характеристики системы регулирования в целом [52, 53].

Хорошо зарекомендовавшим себя и поэтому наиболее распространившимся на сегодня является метод широтно-импульсной модуляции базовых векторов (векторной ШИМ - модуляции) [24, 26, 27, 74, 105].

На рисунке 3.17 приведена функциональная схема перспективного микроконтроллерного электропривода на базе БДПМ (М) с векторной ШИМ – модуляцией и импульсным датчиком углового положения ротора.

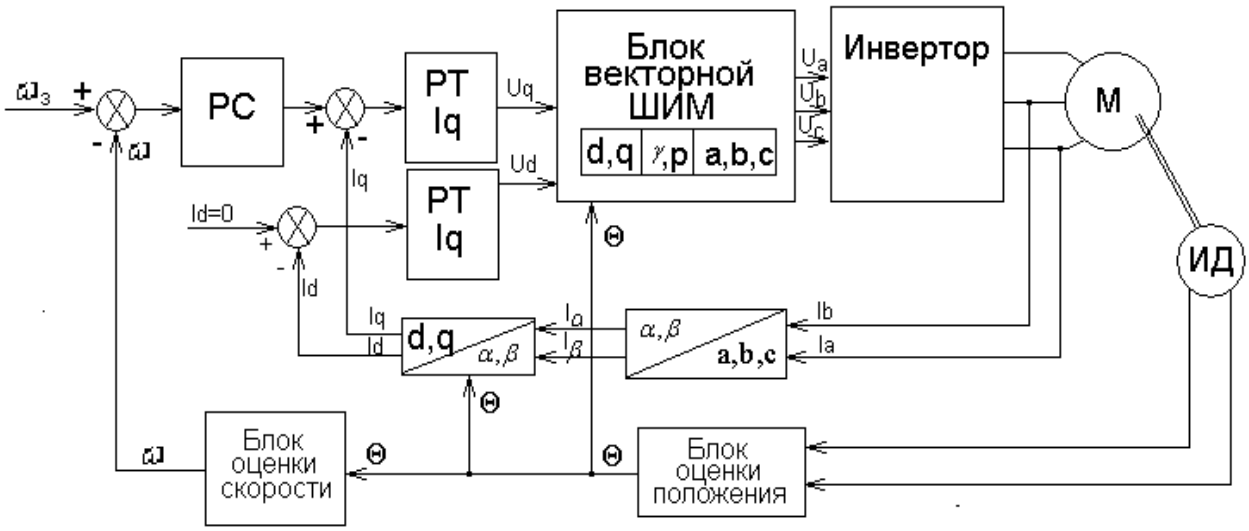


Рисунок 3.17 - Структурная схема электропривода на базе БДПМ с векторным управлением и импульсным датчиком положения

Таким образом, для организации экспериментов, сопутствующих получению высоких динамических и ресурсных характеристик ЭПЦ на базе БДПМ необходим подход, который предполагает использование принципов встроенного управления с широтно-импульсной модуляцией сигналов в фазах, обеспечивающих синусоидальное изменение токов с оптимальным углом коммутации и минимизацией пульсаций электромагнитного момента. Следует отметить, что использование низкой степени интеграции электроники и силовой транзисторной техники определяют заведомо проигрышный вариант разрабатываемого ЭПЦ прежде всего по динамическим, ресурсным и массо – габаритным показателям.

Исполнительные сервоприводы являются специализацией таких ведущих электротехнических компаний как Mitsubishi, Tamagawa, Fanuc (Япония). Диапазон регулирования скорости привода Mitsubishi составляет 1:20000, ошибка регулирования на максимальной частоте вращения ± 0,1 %.

В разработанной в МЭИ системе регулирования реализованы алгоритмов векторного управления с обратной связью на основе DSP– микроконтроллера ADMC 300 фирмы "Analog Devices", аналоги которого выпускаются в КНР.

В рамках разработки и проведения исследований ЭПЦ автоматизированной установки нанесения фоторезиста автор реализовал электронную фазоимпульсную систему управления ЭПЦ на микросхемах средней степени интеграции с коррекцией угла опережения коммутации обмоток [64, 129].

3.3. Моделирование динамических режимов работы центрифуги

Главными требованиями к ЭПЦ являются обеспечение требуемых величин ускорений и их постоянство, то есть линейный закон разгона центрифуги, а также минимальная неравномерность достигнутой частоты вращения. То есть схемотехническая часть ЭПЦ является стандартной, а реализация микропроцессорного управления в соответствии с разработанными законом изменения угла нагрузки в функции ускорения и методикой формирования сигнала задания скорости – оригинальной, авторской.

Задачи исследований следует разделить на два направления. Первое направление посвящено проведению исследований БДПМ с алгоритмами векторного управления ЭПЦ, в котором необходимо выделить ряд задач, направленных на оптимизацию основных характеристик БДПМ.

Управление по напряжению применяется во всех электроприводах с внедрением различных регуляторов, то управление по средствам изменения угла опережения включения строго не детерминировано. В связи с этим проводились исследования динамических характеристик ЭПЦ на базе БДПМ с проработкой теоретических аспектов управления и разработкой методики построения регулятора скорости за счёт изменения угла нагрузки путём опережения включения токов в статорной обмотке бесконтактного двигателя. Для проведения исследований использовались методы имитационного моделирования. В связи с изложенным требовалось решить задачу разработки алгоритмов управления БДПМ, реализующих различные функции путем гибкого динамического управления углом опережения включения.

Разработка структуры САУ ЭПЦ на базе БДПМ с микропроцессорным управлением включает в себя следующие задачи[15, 16]:

- разработка алгоритмов управления по вектору состояния, направленных на обеспечение заданного диапазона регулирования в режиме регулирования частоты вращения, стационарных и динамических характеристик в режиме позиционирования при воздействии координатных возмущений с построением наблюдателей, восстанавливающих недостающие координаты вектора состояния;

- разработка алгоритмов управления ЭПЦ в условиях параметрических возмущений и мультипликативных воздействий, изменений момента нагрузки в широких пределах, коэффициентов усиления динамических звеньев на основе современных адаптивных принципов построения;

- разработка алгоритмов самодиагностики с идентификацией состояния ЭПЦ.

Исходя из анализа системотехнических подходов к построению ЭПЦ на базе БДПМ, изложенных с учетом анализа тенденций развития основных функциональных элементов и характеристик электромеханической составляющей, сформируем структуру его аппаратной части [9].

Рассмотрим трехфазную систему построения питания БДПМ, которая описывается выражениями для фазных координат:

$$U_A = U \cdot F_A\left(\varphi_{эл} + \theta_i\right), \tag{3.9}$$

$$U_B = U \cdot F_B\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3} + \theta_i\right), \tag{3.10}$$

$$U_C = U \cdot F_C\left(\varphi_{эл} + \frac{4\pi}{3} + \theta_i\right). \tag{3.11}$$

где U – напряжение питания БДПМ;

F_A, F_B, F_C - вид функций «замыкания» фазных МДС

φ – угол поворота ротора;

θ_i – угол опережения включения, который определяется по формуле (1.4), зависящий от нагрузки.

Для того, чтобы вращающий момент двигателя был постоянным и не зависел от угла поворота ротора, необходимо реализовать синусоидальное изменение функций м.д.с. FA, Fв, Fc от угла поворота ротора. Реализация данного принципа предполагает использование датчика положения угла с непрерывным изменением выходного сигнала в функции угла поворота.

Для проведения исследования в рамках поставленных выше задач, рассмотрим эквивалентную приведенную функциональную схему двухфазного ЭПЦ на базе БДПМ в подвижных координатах q и d с синусоидальными сигналами в фазах, которая показана на рисунке 3.18.

На рисунке 3.18 обозначено: φ, $\varphi_{эл}$ – геометрический и электрический углы поворота ротора двигателя; $\varphi_{зад}$ – заданный угол поворота; $\Omega_{зад}$ – заданная частота вращения; Ω – оценка частоты вращения; θ – угол опережения включения; U – управляющее воздействие; w_α, w_β – обмотки статора БДПМ; i_q, i_d – токи в подвижных координатах q и d; U_α, U_β, i_α, i_β – соответственно, напряжения и токи в фазах БДПМ; ПК – преобразователь координат.

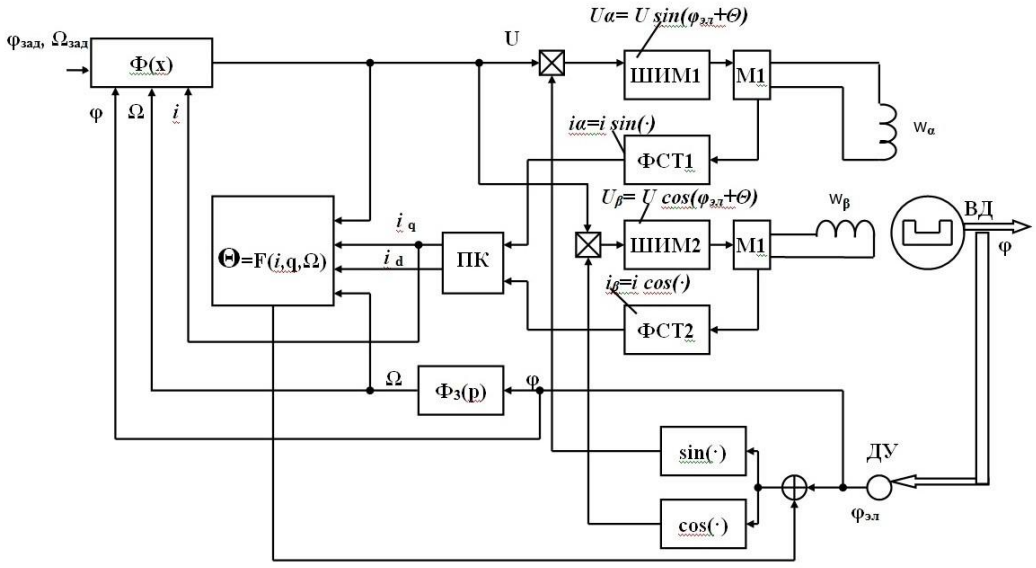


Рисунок 3.18 - Функциональная схема эквивалентного приведённого двухфазного ЭПЦ на базе БДПМ в подвижных координатах q и d с формированием синусоидальных сигналов в фазах

Приведенный вариант схемы на рисунке 3.18 принят за базовый с дальнейшим его развитием. Например, приведенная структура не исключает введения контуров регулирования токов в фазах α и β или в координатах d и q. Функциональные блоки $\theta = F(i_q, \Omega)$ и Ф(x), представляют в самом обобщенном виде регуляторы вектора состояния БДПМ и ЭПЦ в целом.

Сложные технические системы обладают рядом особенностей, осложняющих процесс моделирования. Для центрифуг на основе БДПМ - это нестационарность и нелинейность, и, как следствие, плохая формализуемость связей между ускорением и углом нагрузки.

Методы построения нечетких моделей и алгоритмов управления, именуемых нечеткими регуляторами, решающие задачи управления центрифугами для нанесения фоторезиста, оснащены алгоритмами обучения и состоят из совокупности продукционных правил вида:

$$
\begin{aligned}
&R^1\text{: если } x_1 \text{ есть } X_1^1 \text{ и } x_2 \text{ есть } X_2^1 \text{ и \ldots и } x_m \text{ есть } X_m^1,\\
&\quad \text{то } y_1 \text{ есть } Y_1^1 \text{ и } y_2 \text{ есть } Y_2^1 \text{ и \ldots и } y_n \text{ есть } Y_n^1\\
&\text{или } \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&R^\theta\text{: если } x_1 \text{ есть } X_1^\theta \text{ и } x_2 \text{ есть } X_2^\theta \text{ и \ldots и } x_m \text{ есть } X_m^\theta,\\
&\quad \text{то } y_1 \text{ есть } Y_1^\theta \text{ и } y_2 \text{ есть } Y_2^\theta \text{ и \ldots и } y_n \text{ есть } Y_n^\theta
\end{aligned}
\qquad (3.12)
$$

где θ – номер правила;

$\boldsymbol{x} = (x_1, \ldots, x_m)$, $\boldsymbol{y} = (y_1, \ldots, y_n)$ – векторы входных переменных и выходных показателей, которые характеризуются соответствующими нечеткими множествами X_j^θ, Y_i^θ, $j = \overline{1,m}$, $i = \overline{1,n}$, в θ-ом правиле, $\theta = \overline{1,q}$.

В свою очередь, нечеткие множества X_j^θ, Y_i^θ описываются функциями принадлежности $X_j(x_j, \boldsymbol{d}_j^\theta)$, $Y_i(y_i, \boldsymbol{d}_i^\theta)$, зависящими от входных x_j и выходных y_i

переменных, а также от векторов параметров $\boldsymbol{d}_j^{\theta}$, $\boldsymbol{d}_i^{\theta}$, $j=\overline{1,m}$, $i=\overline{1,n}$, $\theta=\overline{1,q}$, ($\boldsymbol{d}_j^{\theta} \neq \boldsymbol{d}_i^{\theta}$, если $i = j$).

В рассматриваемой нечеткой модели (3.12) с m входами и n выходами (*MIMO* – система) выходы y_1, …, y_n являются независимыми, что дает возможность представить ее в виде n групп правил (подмоделей) с m входами и одним выходом (*MISO* – система).

Нечеткая модель,, представленная качественными правилами (3.13), была разработана Сугено и Яшукавой [72]:

$$R_i^{\theta}: \text{если } x_1 \text{ есть } X_1^{\theta}, x_2 \text{ есть } X_2^{\theta}, \ldots, x_m \text{ есть } X_m^{\theta}, \text{ то } y_i \text{ есть } Y_i^{\theta}, \qquad (3.13)$$

где $\theta=\overline{1,q_i}$, $i=\overline{1,n}$, а связка “и” заменена запятой.

Результаты расчётов по этой модели были сопоставлены с результатами расчёта модели, полученной на основе аналитического выражения (1.4). Практически оба подхода показами полную идентичность, однако, аналитическая модель выигрывает с точки зрения требований к вычислительным ресурсам, а поскольку центрифуга – объект с приоритетными требованиями к динамическим характеристикам, предпочтение для программной реализации было отдано аналитической модели.

В рамках работы выполнено исследование динамических характеристик ЭПЦ с указанными ранее регуляторами.

На рисунке 3.19 приведена разработанная структурная схема, описывающая динамику ЭПЦ с векторным управлением БДПМ в подвижной системе координат [83], которая позволяет провести исследования на предварительном этапе. Функциональная схема моделирования ЭПЦ в ПО Matlab изображена на рисунке 3.20.

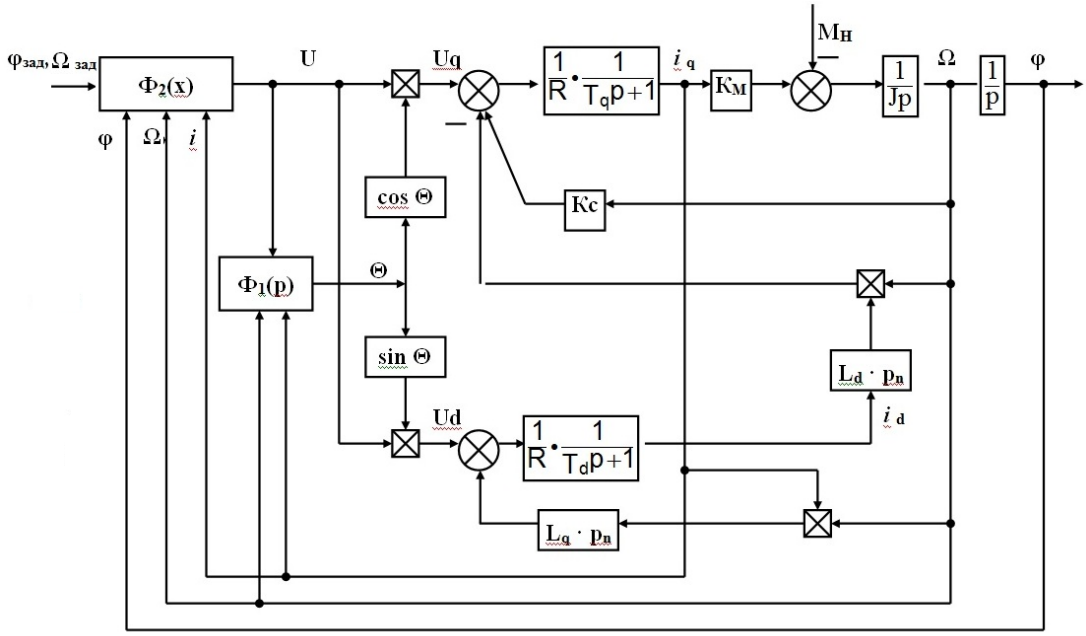


Рисунок 3.19 – Структурная схема ЭПЦ на базе БД в подвижной системе координат

На рисунках 3.21 – 3.23 приведены структурные схемы моделей ЭПЦ при регулировании скорости, систем автоматического управления (САУ) [50, 51] и регуляторов [14, 16, 49, 50, 51], а также переходные процессы центрифуги по скорости и моменту (рис. 3.24 – 3.33).

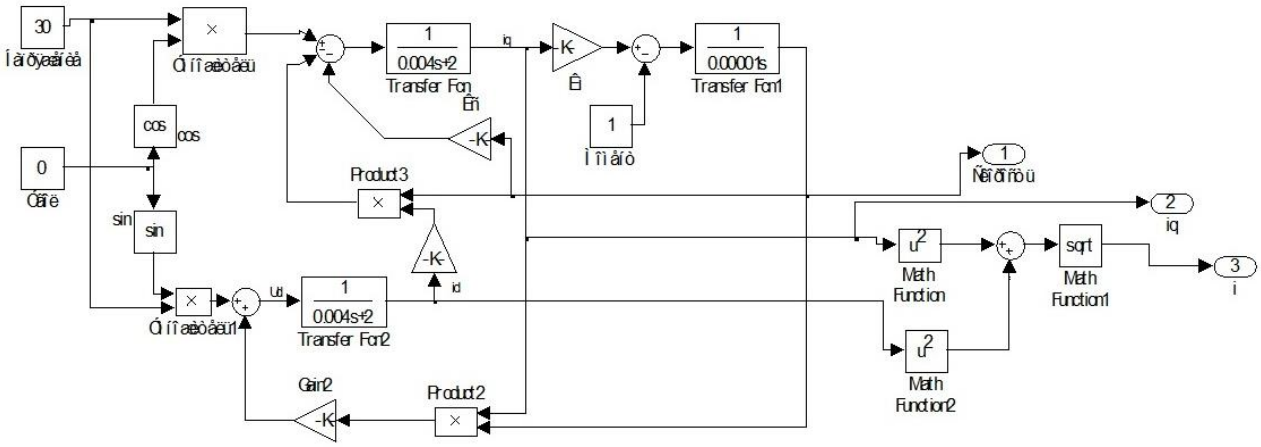


Рисунок 3.20 – Функциональная схема исходной модели для проведения исследований динамических характеристик ЭПЦ на базе БДПМ во вращающейся системе координат в ПО Matlab

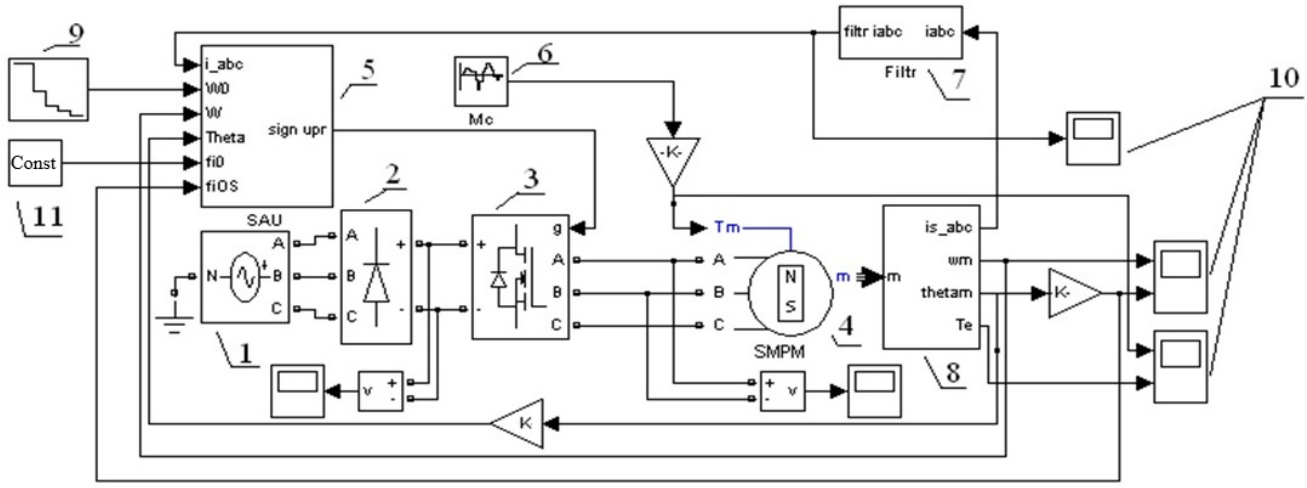


Рисунок 3.21- Структурная схема модели системы регулирования скорости ЭПЦ

На рисунке 3.21 приняты следующие обозначения: 1 – Источник переменного напряжения (220 В, 400 Гц); 2 – Выпрямитель; 3 – Управляемый инвертор; 4 – Синхронный двигатель с постоянным магнитом; 5 – САУ; 6 – Блок задания момента нагрузки; 7 – Фильтр низких частот; 8 – Измеритель; 9 – Блок задания частоты вращения ротора; 10 – Осциллограф; 11 – блок задания критического угла опережения включения.

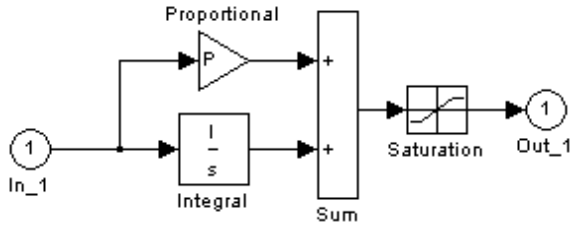


Рисунок 3.22 - Структура PI – регулятора

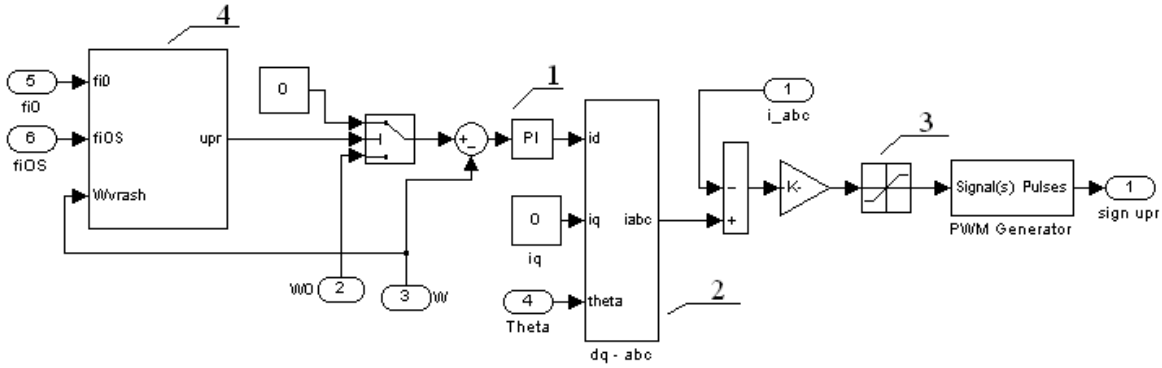


Рисунок 3.23 - Структурная схема САУ

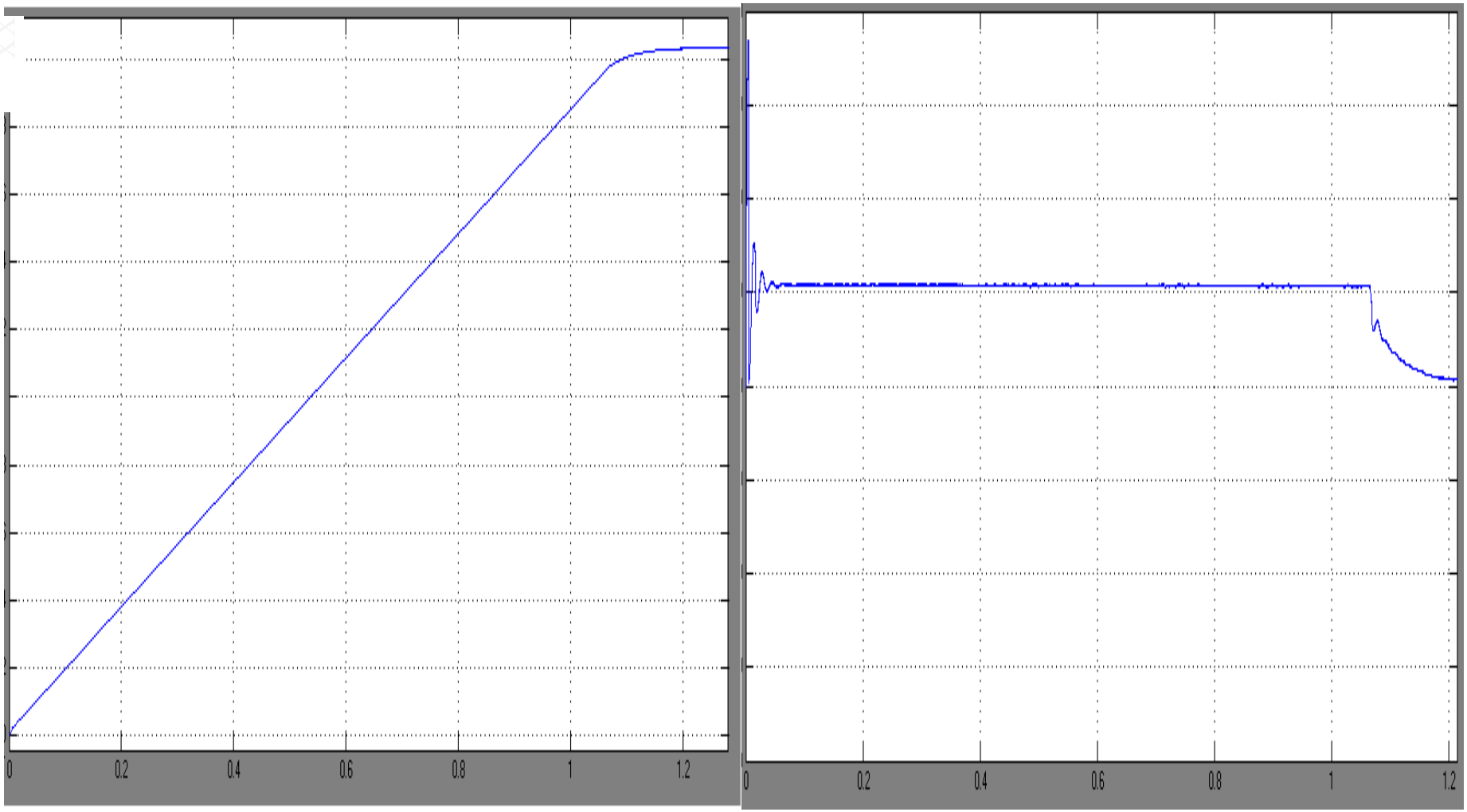
На рисунке 3.23 используются обозначения: 1 – пропорционально-интегральный регулятор; 2 – блок преобразования координат dq в координаты abc; 3 - генератор управляющих импульсов; 4 – вспомогательная система подсчета угла торможения.

Формирование блоков преобразования координат d, q → a, b, c примет вид:

$$\begin{cases} i_a = i_d \cdot \sin\gamma - i_q \cdot \cos\gamma, \\ i_b = i_d \cdot \sin(\gamma - \frac{2}{3}\cdot\pi) - i_q \cdot \cos(\gamma - \frac{2}{3}\cdot\pi), \\ i_c = i_d \cdot \sin(\gamma + \frac{2}{3}\cdot\pi) - i_q \cdot \cos(\gamma + \frac{2}{3}\cdot\pi). \end{cases} \quad (3.14)$$

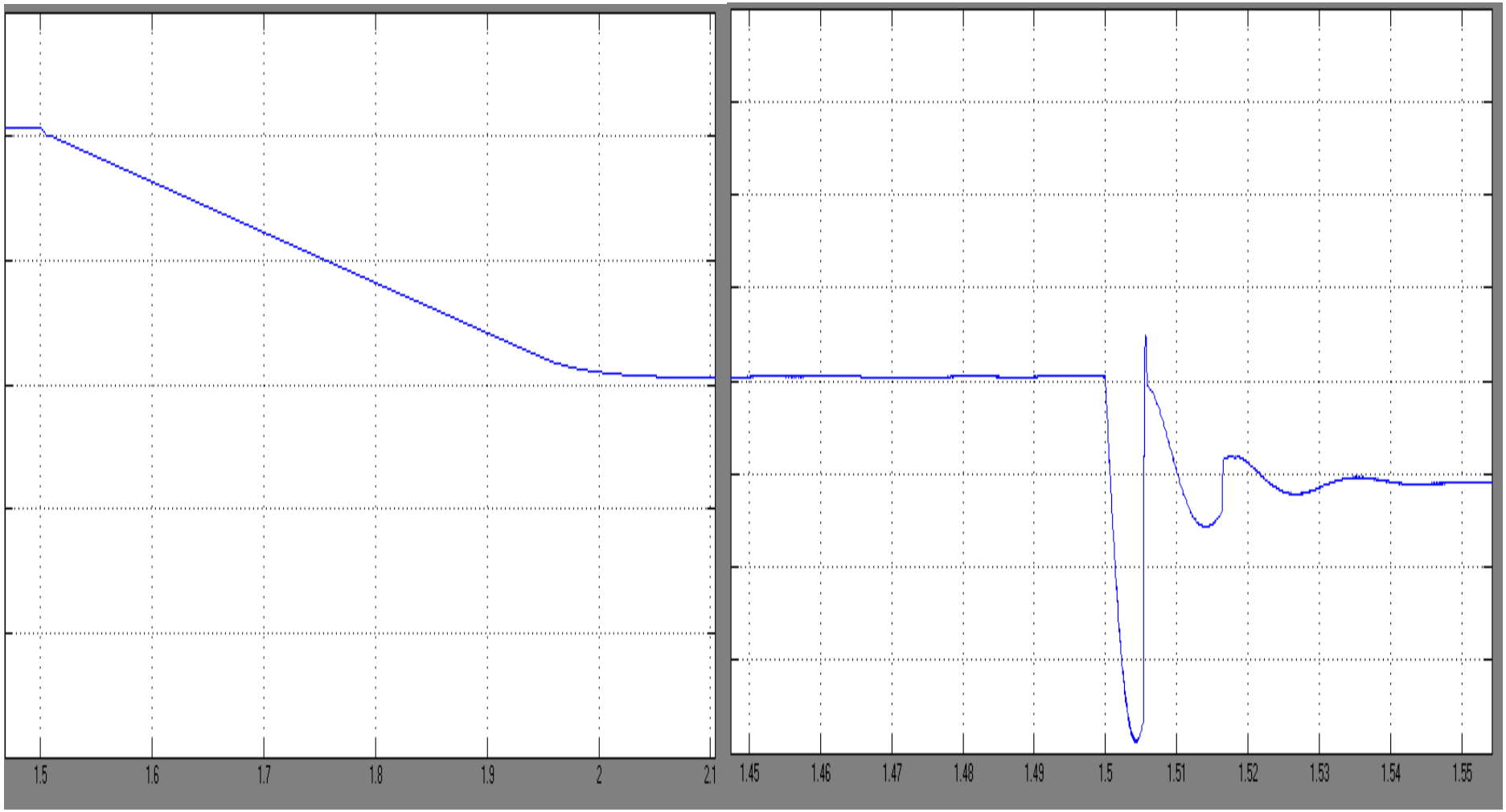
Сделан вывод, что переходные процессы центрифуги по скорости в конце самого процесса исключают как перерегулирование, так и экспоненциальный характер изменения скорости [15, 16]. При этом формируется значение коэффициента линейности скоростной характеристики порядка 1.

Результаты моделирования показывают количественную зависимость параметров переходных процессов от угла нагрузки, в частности, сокращения длительности переходных процессов при введении положительного приращения этого угла в случае наброса нагрузки.



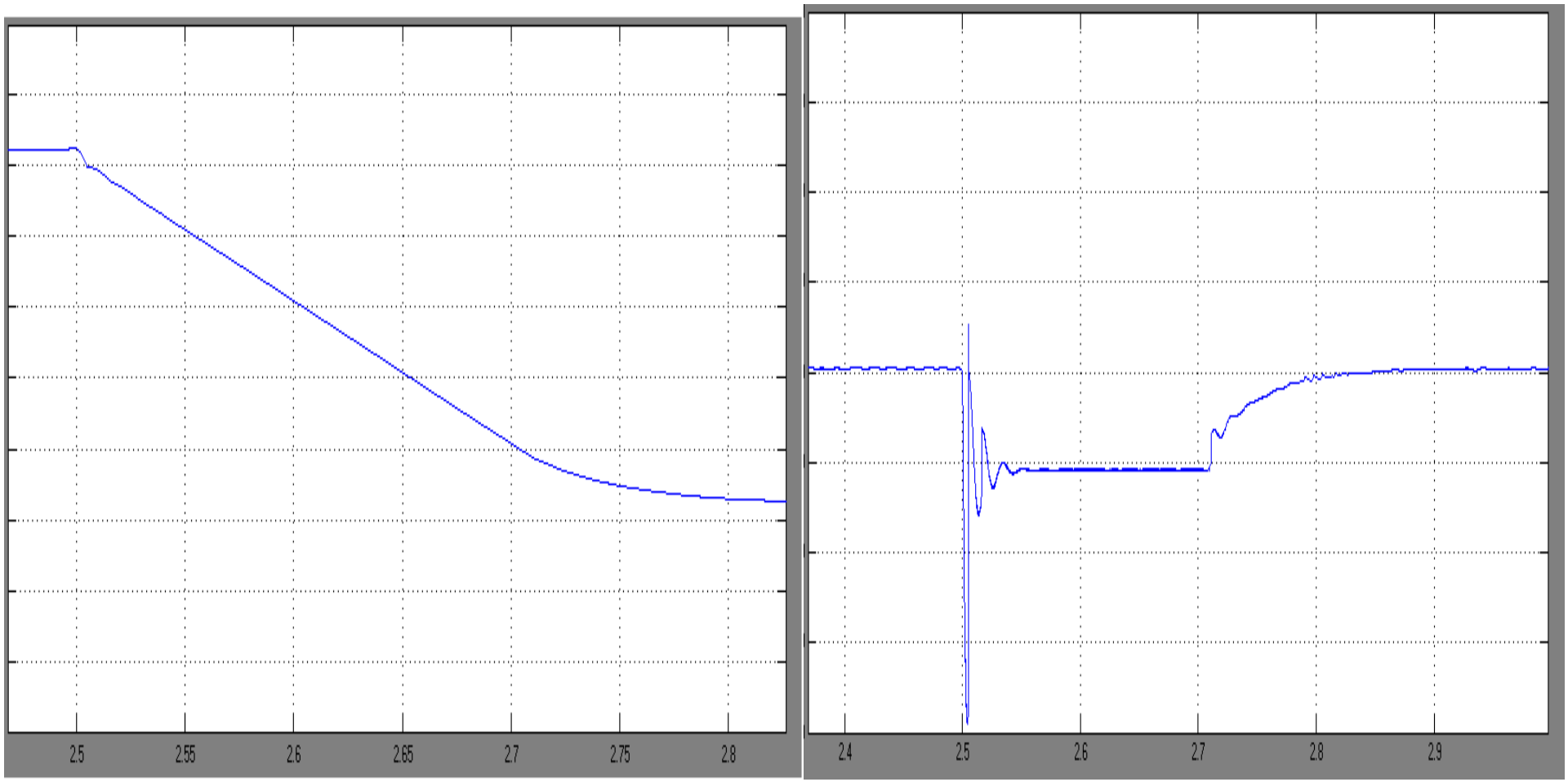
а) частота вращения б) электромагнитный момент

Рисунок 3.24 – Разгон с Ω= 0 до Ω_{max} = 10000 об/мин (1046 рад/с)



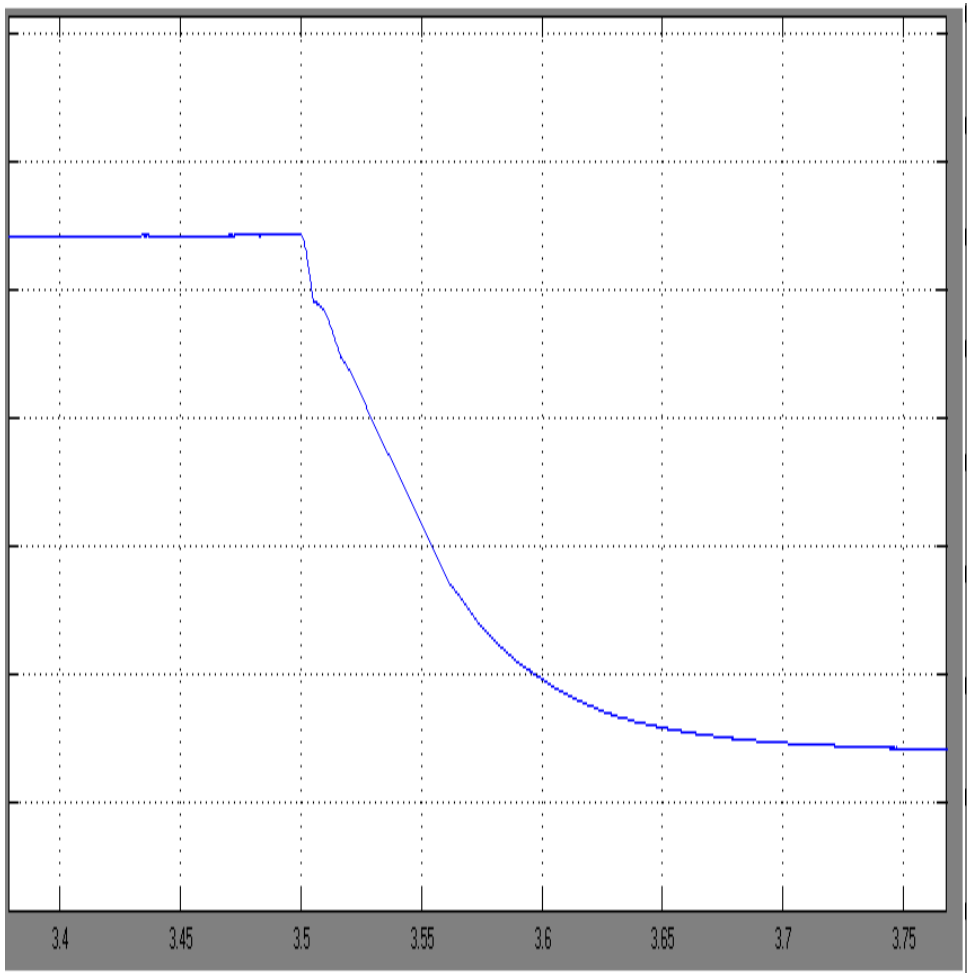
а) частота вращения б) электромагнитный момент

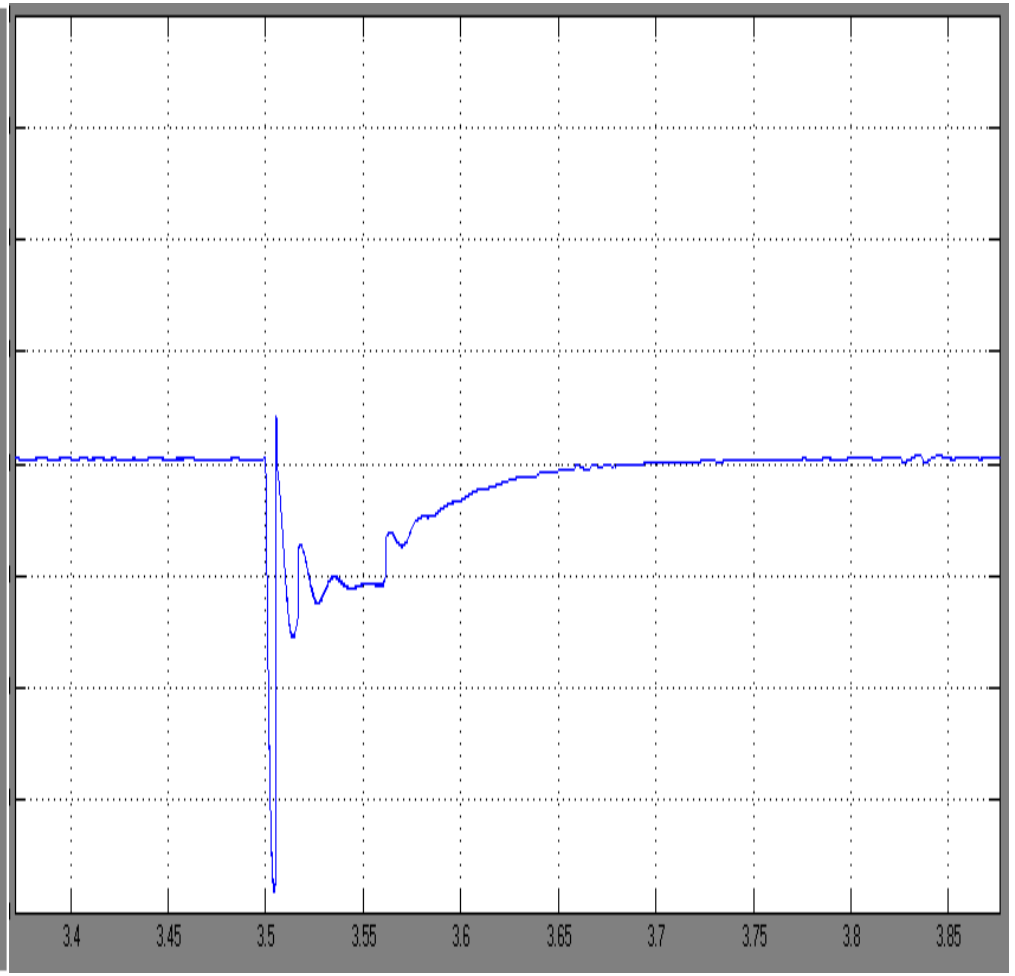
Рисунок 3.25 – Торможение с Ω_{max} = 10000 об/мин (1046 рад/с) до Ω = 6000об/мин (628 рад/с)



а) частота вращения б) электромагнитный момент

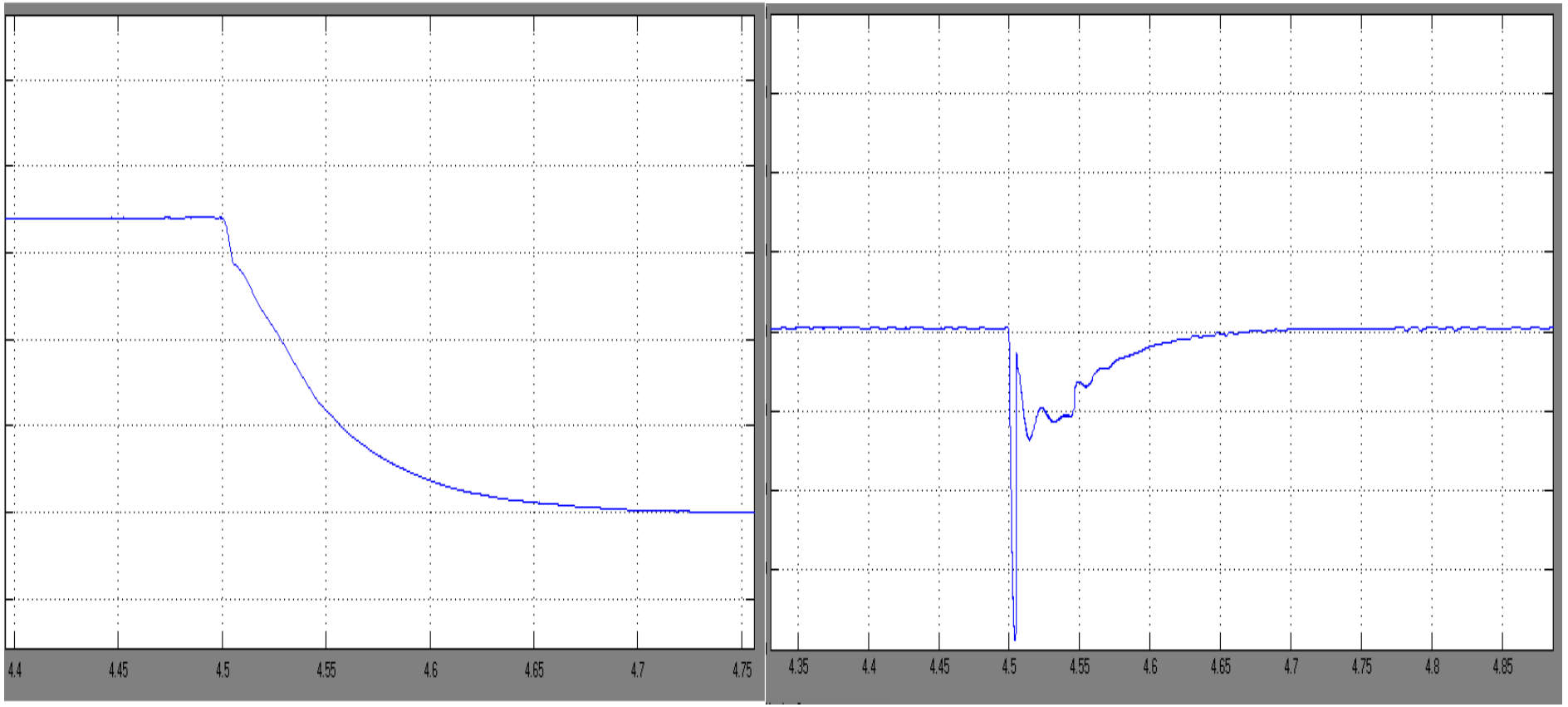
Рисунок 3.26 – Торможение с Ω_{max} = 8200 об/мин до Ω = 3300об/мин





а) частота вращения б) электромагнитный момент

Рисунок 3.27 – Торможение с Ω_{max} = 5400 об/мин до Ω = 1400об/мин



а) частота вращения б) электромагнитный момент

Рисунок 3.28 – Торможение с Ω_{max} = 5000 об/мин до Ω = 1600об/мин

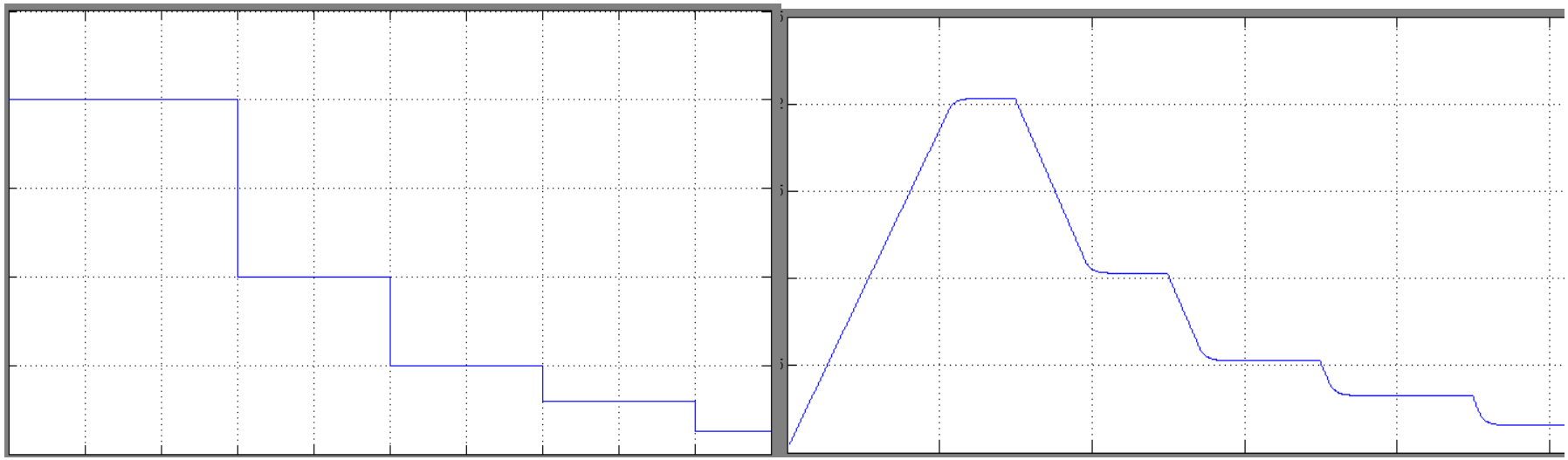


Рисунок 3.29 - Сигнал задания частоты вращения (рад/с)

Рисунок 3.30 - Скорость на валу (рад/с)

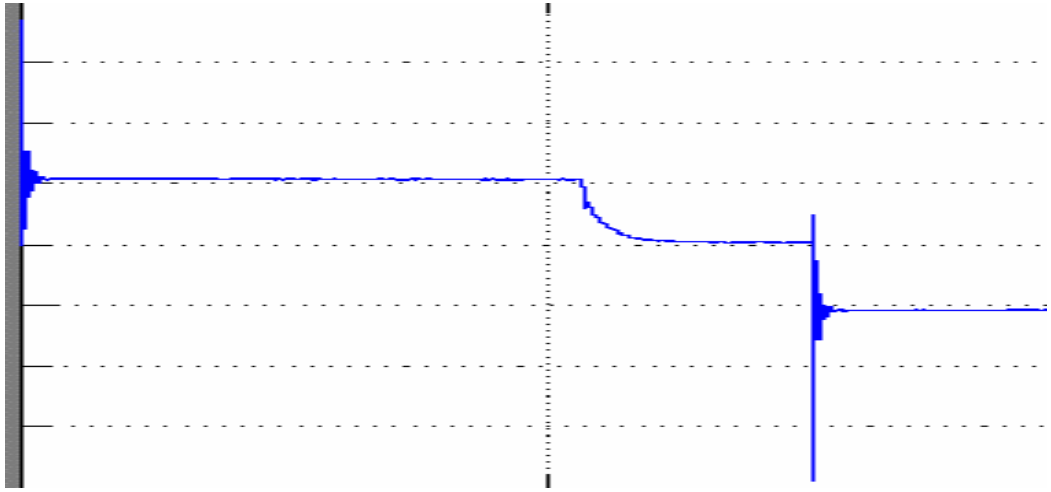
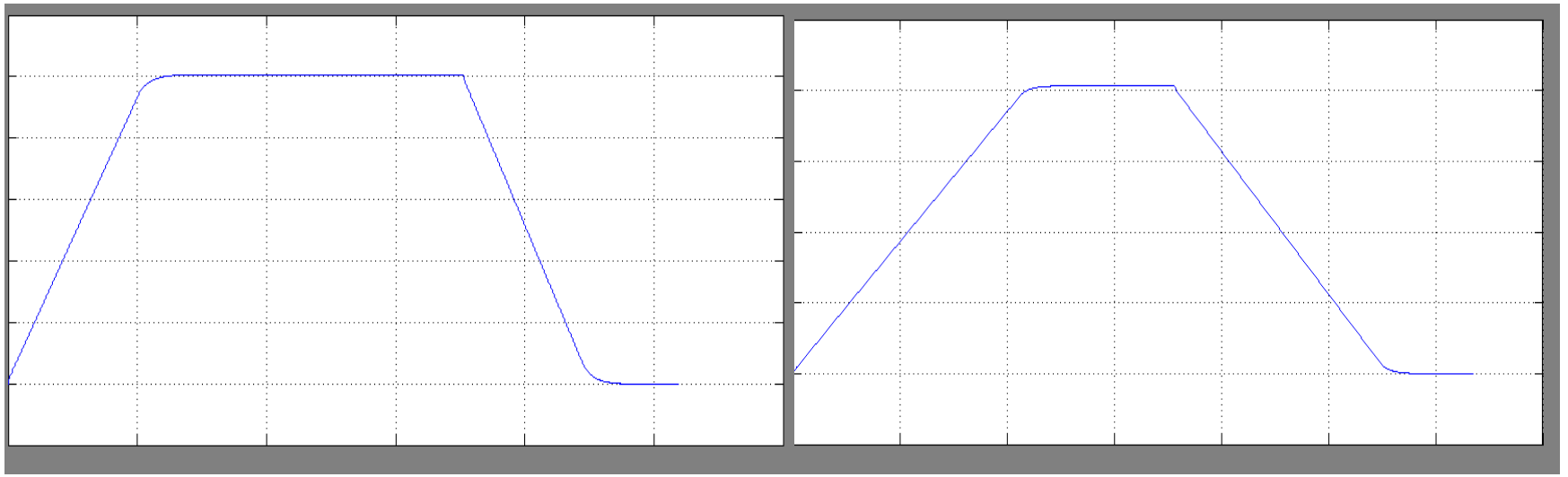
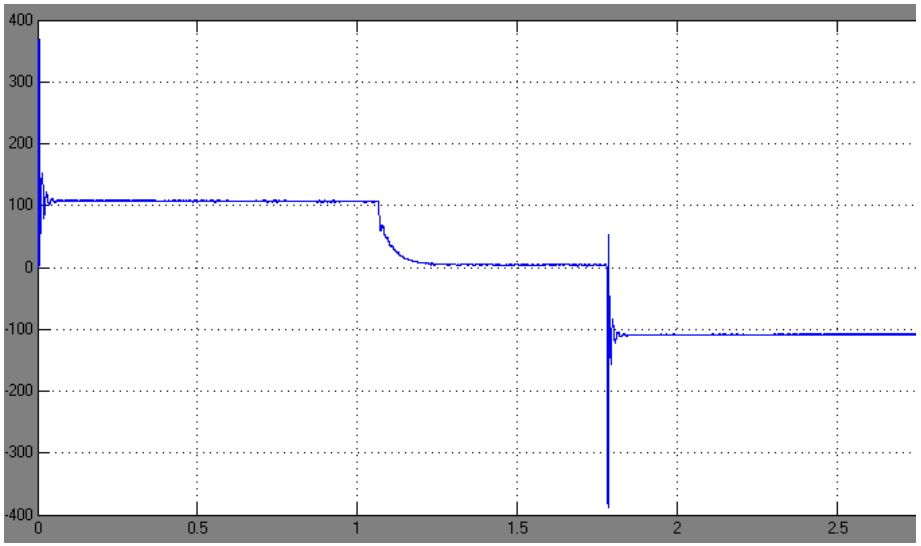


Рисунок 3.31 – Электромагнитный момент

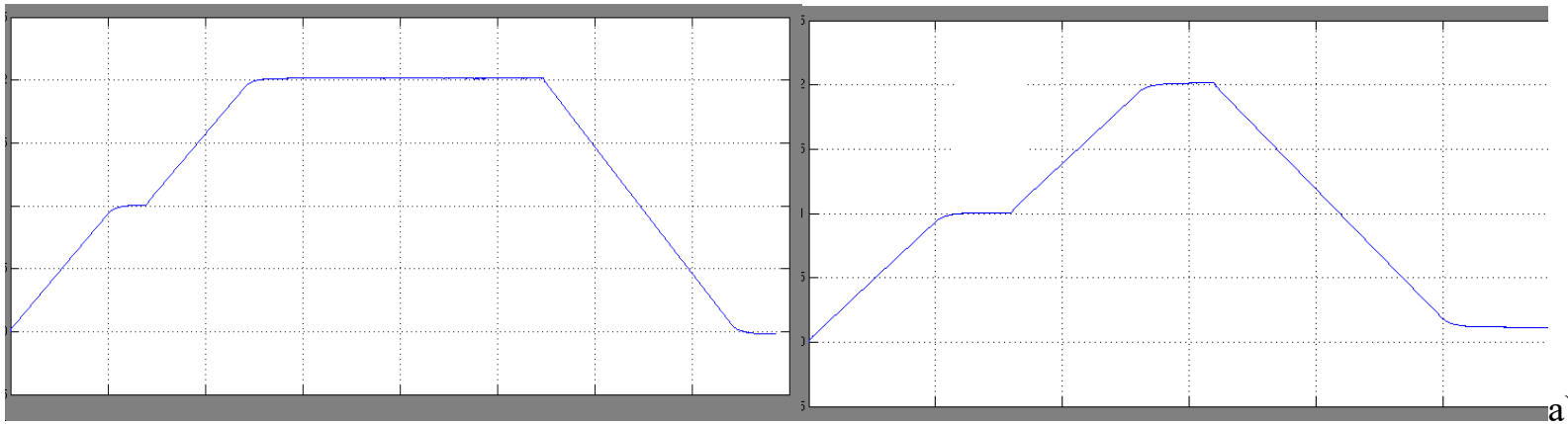


а) частота вращения

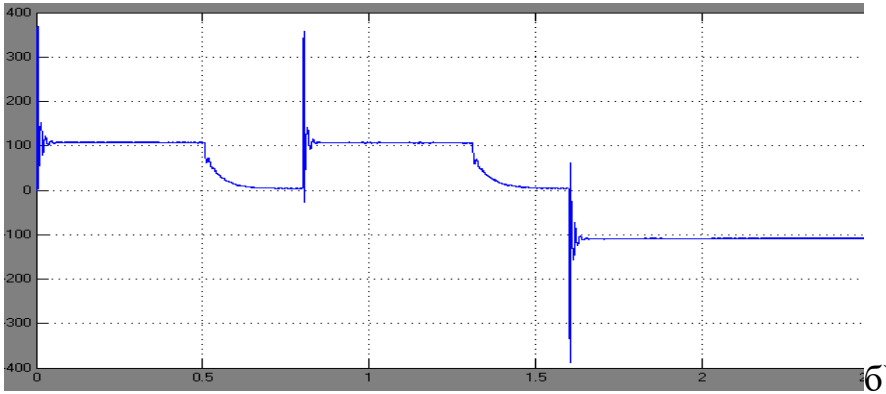


б) электромагнитный момент

Рисунок 3.32 - Разгон с ускорениями 5000 рад/с^2 и 2500 рад/с^{2}от Ω=0 до Ω= 10000об/мин и торможение



а) частота вращения



б) электромагнитный момент

Рисунок 3.33 - Разгон от **Ω**=0 до **Ω**= 2000об/мин и от **Ω**= 2000 до **Ω**= 5000об/мин с последующим торможением

3.4. Выводы по главе 3

Центральным вопросом в ходе проектирования современных установок нанесения фоторезистов является проектирование высокобыстродействующих ЭПЦ, одновременно обеспечивающих линейность динамической характеристики скорости (постоянство ускорения) в широком диапазоне регулирования, равномерность толщины плёнки фоторезиста, а также максимально возможный ресурс работы.

Создана новая методика формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающая работу привода с постоянным ускорением и поддержание установившейся скорости вращения. т.е. решается проблема обеспечения требуемого вида переходного процесса разгона центрифуги. Иначе говоря, получили микропроцессорную реализацию управляющего сигнала пуска центрифуги с постоянным ускорением и поддержание установившейся скорости.

В отличие от регуляторов эта методика обеспечивает прямое и эффективное воспроизведение требуемых показателей вида переходного процесса разгона центрифуги, так как малая длительность переходного процесса пуска двигателя не позволяет внедрить в алгоритм управления разгоном сколь-нибудь сложные законы управления, требующие серьезных логических или математических расчетов. Для выполнения функции поддержания скорости вращения в стационарном режиме работы можно разработать ряд логических правил. Их реализация не будет иметь строго математическое соотношение, а больше напоминать некий логический регулятор.

Для получения функций, описывающих закон изменения скорости центрифуги, наилучшие результаты дал метод наименьших квадратов.

Участок линейного спада управляющего сигнала вносит сглаживание в зону выхода на стационарный режим работы и, при необходимости, может быть скорректирован по длительности и амплитуде. С учётом параметров формирования управляющего сигнала можно сказать, что реализация

программного пуска системы с постоянным ускорением может быть выполнена как на 8-разрядных, так и на 16-ти разрядных микроконтроллерах, при этом очевидных преимуществ у одних перед другими нет.

В ходе работы выполнено исследование динамических характеристик ЭПЦ с пропорционально-интегральным регулятором.

Применение БДПМ как серводвигателя ЭПЦ обеспечивает требуемое быстродействие и ресурс работы ЭПЦ.

Определение функции изменения угла опережения включения в зависимости от величины заданного ускорения в соответствии с (1.4) позволило компенсировать возмущения, вызванные изменениями нагрузки центрифуги, обеспечив постоянство ускорения, то есть достигнуть требуемых толщин и равномерности формируемой плёнки фоторезиста.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ НАНЕСЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА

4.1. Особенности микропроцессорного обеспечения в рамках отечественной практики

Выбор микропроцессора как базового вычислительного элемента во многом определяет свойства каждого модуля системы управления.

Рассмотрим состояние вопроса по микроконтроллерам, ориентированным на управление электроприводами, сложившееся в мире. Ведущими компаниями, лидирующими в этой области, являются «Intel», «Siemens AG», «Texas Instruments», «Infineon Tehnologies AG», «Analog Devices» [89, 92, 104, 121, 128]. Основным отличием этих процессоров является наличие специальной периферийной архитектуры, например – генераторов ШИМ, используемых для генерации управляемых по определённому закону импульсов питающего напряжения в обмотках БД с частотой 10÷20 кГц; преобразователей координат, позволяющих выполнять преобразования для цифровой модели из неподвижной системы, связанной с обмотками, в подвижную, связанную с ротором, и наоборот за единицы микросекунд; для обработки сигналов от датчиков имеются структуры эстиматоров скорости и АЦП с разрешением более 10 разрядов и временем преобразования менее 5 мкс. Производительность таких процессоров – 10 ÷ 20 мил. операций в сек. (MIPS) [107].

Компания «Siemens AG» является лидером в области 8- ми и 16-ти битных микроконтроллеров, а разработанная ей серия C165/166/167 стала мировым стандартом [34, 89].В семействе C166 для управления ЭСП сейчас используются микроконтроллеры 80C166, C167, C167CR и C165. Модуль CAPCOM6 в микроконтроллере C504 идеально подходит для управления ЭПЦ.

Отечественные микроконтроллеры, по сравнению с характеристиками микроконтроллеров «Intel» и «Siemens», покаимеют достаточно скромные

характеристики. Тем не менее, для управления ЭПЦ можно использовать 16-разрядный микроконтроллер Л1874ВЕ36, разработка АО «НИИЭТ», г. Воронеж [80]. Главное, что он имеет блок формирования ШИМ, 8-канальный 10-разрядный АЦП, шесть 16-разрядных таймеров [28]. Тактовая частота 20 МГц, ПЗУ 8 К [119]. Структурная схема Л1874 ВЕ36 показана на рисунке 4.1.

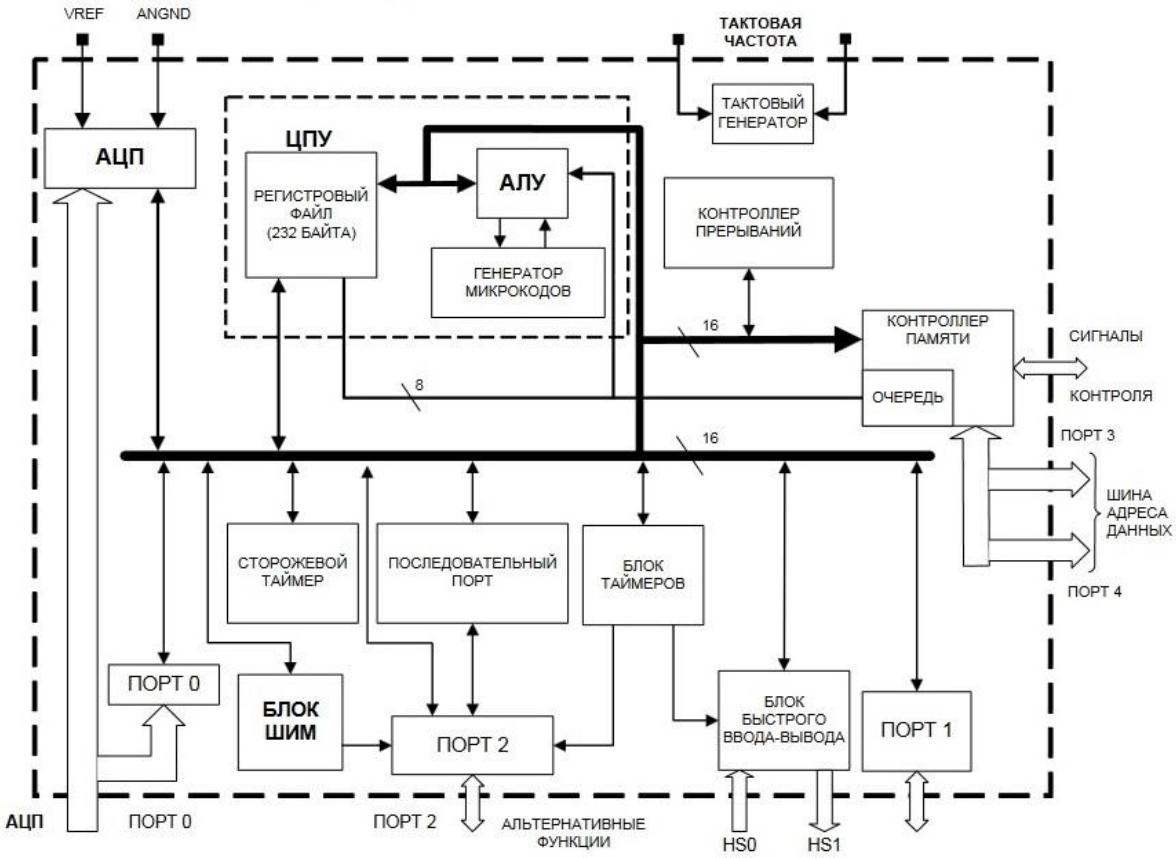


Рисунок 4.1 - Структурная схема микроконтроллера Л1874 ВЕ36

В таблице 4.1 приведены основные характеристики микропроцессоров и микроконтроллеров, разработанных АО «НИИЭТ», г. Воронеж.

В таблицу 4.2 сведены характеристики микроконтроллеров, наиболее предпочтительные для различных уровней системы управления автоматической установки нанесения фоторезиста [38, 92, 104].

Таблица 4.1 - Характеристики отечественных цифровых сигнальных процессоров разработки НИИЭТ г. Воронеж

Тип микропроцессора, микроконтроллера	Производительность	ОЗУ	ПЗУ	Разрядность	Потребляемая мощность	Тактовая частота	АЦП/ ШИМ	Напряжение питания	Диапазон рабочих температур	Функциональный аналог	Объём адресуеиой памяти	Кол-во портов/таймеров
М1867ВМ1	5 MIPS	144×16	1.5К×16	16 бит	0,165Вт	20 МГц	-	+5 В	от -60 до +85 °С	TMS 32 ос10 Texas Instruments	-	-
Л1867ВМ2	10 MIPS	544×16	4К×16	16 бит	1 Вт	40 МГц	-	+5 В	от -60 до +85 °С	TMS 32 ос25 Texas Instruments	-	-
Н1830ВЕ31	-	256×8	4Кбайт	8 бит	132 мВт	12 МГц	-	+5 В	-60 до +85°С	8 ос 51 Intel	64Кбайт	4/2
1874ВЕ36	-			16 бит	300 мВт	20МГц	8 кан (10 разр)/+	+5В	-60 до +85°С	-	64 Кбайт	5
Л1874ВЕ36	10 MIPS	232×16	8Кбайт	16 бит	300 мВт	20 МГц	8 кан (10 разр)/+	+5В	-60 до +85°С	I 83 С 196 КВ-12	64 Кбайт	5/6

Таблица 4.2 - Сравнительные характеристики микроконтроллеров дляразличных уровней системы управления автоматической установки нанесения фоторезиста

Тип микропроцессора, микроконтроллера	Производительность		ПЗУ	Разрмерность	АЦП/ ШИМ
"НИИЭТ" Л1874ВЕ36	10 MIPS	232×16	8 Кбайт	16 бит	8 каналов (10 разрядов)/1
"Intel" 8XC196KC\8XC196KD	10 MIPS		16/32 Кбайт	16 бит	8 каналов/3
"SIEMENSAG" C167CR		4k	128 (128 Flash)	16 бит	(16/10)/1
"Texas Instrument" TMS 320'24F241	20 MIPS	544	встроенная Flash 8k	16 бит	8 канальный (10 разрядов)/8
"Texas Instrument" TMS 320'240LF2407	30 MIPS	544	встроеннаяFlash 32k/ загрузочное ПЗУ 256		16 канальный(10 разрядов/16
Требуемые параметры	Не менее 10 MIPS	не менее 512	не менее 512 / Flash более 8 k	16-32 бит	10-16 разрядов (6-8 штук)/ 10-16 разрядов (2-4 шт)

4.2. Описание аппаратной части системы управления и настройка системы стабилизации температурных параметров

Аппаратная часть установки, если рассматривать её как систему управления, состоит из ряда устройств, обладающих набором входных и выходных сигналов определенного типа.

Система управления состоит из двух иерархических уровней [8, 11]. На верхнем уровне системы автоматического управления расположен промышленный компьютер (ПК) с различными платами (устройствами) расширения под управлением операционной системы Windows. Использованные среды разработки: C++ и STEP7. [110, 109]. На втором уровне размещены программируемые логические контроллеры (ПЛК) фирмы Siemens CPU 224 семейства S7-200 [89]. На исполнительном уровне системы управления размещены блоки управления приводами и исполнительными механизмами и сенсоры.

Подключение ПЛК к промышленному компьютеру осуществляется посредством COM портов. Номера портов с четвертого по шестой. Параметры COM порта: 9600 бит/сек, 8 бит данных, четность не контролируется, 1 стартовый и 1 стоповый биты. Для подключения используется преобразователи RS-232 - RS-485 фирмы Siemens [148]. Рекомендуемая среда разработки STEP7 [109, 147].

В системе управления имеются покупные изделия, сопровождаемые драйверами и алгоритмами обмена и функционирования. Эти устройства, которые можно назвать модулями, подключаются к промышленному компьютеру через стандартные интерфейсы (RS-232, USB, Ethernet).

К таким модулям относятся:

ПИД-регулятор ТРМ-101-СР фирмы ОВЕН [87]. Предназначен для задания и поддержания температуры «горячей» плиты модуля термообработки п/п подложек. Подключение данного модуля к промышленному компьютеру

осуществляется по среддствам преобразователя USB - RS-485 АС-4 фирмы ОВЕН [88]. Параметры обмена через виртуальный COM порт: 9600 бит/сек, 8 бит данных, четность не контролируется, 1 стартовый и 1 стоповый биты. Протокол обмена фирмы ОВЕН.

В целом система стабилизации температурных параметров содержит в себе три однотипных канала, вид которого приведен на рисунке 4.2. Эти каналы призваны обеспечивать непрерывный контроль за постоянством заданных температур фоторезиста и рабочих поверхностей плит термообработки и термостабилизации через управление импульсными источниками питания соответствующих нагревателей, которые необходимы в условиях работы установки в рабочем объёме с контролируемой газовой средой.

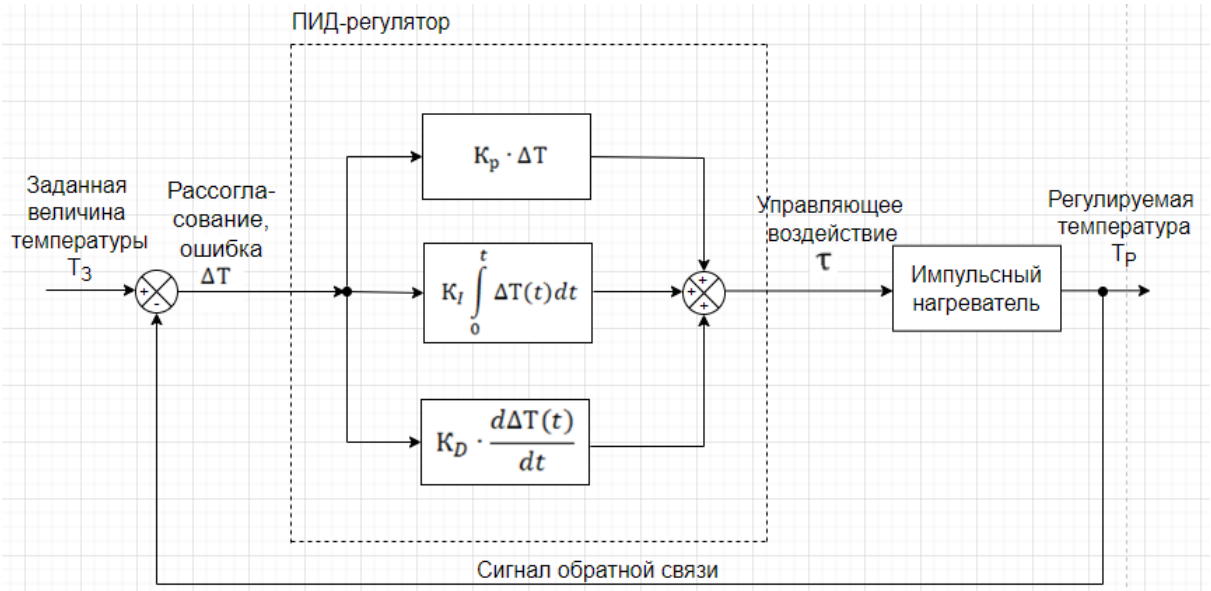


Рисунок 4.2 - Функциональная схема канала системы стабилизации температурных параметров

Электропривод центрифуги подключен к промышленному компьютеру через COM порт номер 1. Параметры обмена через COM порт: 9600 бит/сек, 8 бит данных, чётность не контролируется, 1 стартовый и 1 стоповый биты.

Термостат жидкостный ВТВ-1 объем 8 литров. Производитель фирма ТЕРМЕКС. Данный модуль служит для поддержания установленной

температуры фоторезиста. Подключение его к ПК осуществляется через COM порт номер 3. Параметры обмена через виртуальный COM порт: 9600 бит/сек, 8 бит данных, четность не контролируется, 1 стартовый и 1 стоповый биты. Протокол обмена фирмы ТЕРМЕКС.

Исполнительные и информационные устройства разделяют на быстродействующие электромеханические устройства и датчики, которые в свою очередь требуют импульсного или аналогового управления с высокой частотой и разрешением и на сравнительно инерционные устройства, например, пневматические (клапаны управления пневмоциллиндрами, генераторы и датчики вакуума), которые не предъявляют высоких требований к быстродействию управляющей системы.

Для корректной и отвечающей требованиям температурного режима работы установки УНФ-200А параметры ПИД-регулятора модуля термообработки настраиваются следующим образом.

Нормальный режим работы нагревательного элемента (выполняется при включении установки) нагревает платформу до температуры 150° за время порядка 120 секунд. То есть скорость нагрева составляет порядка 1°/с. При холодном запуске запаздывание выходного сигнала, обусловленное временем, необходимым для выхода нагревательного элемента в рабочий режим составляет порядка 2 секунд. В режиме поддержания температуры нагревательный элемент и рабочая плита имеют малую разность температур, поэтому выходная характеристика имеет чисто экспоненциальный характер и должна обеспечивать нагрев со скоростью порядка 1,5 ÷ 2°/с.

Передаточная функция объекта управления имеет коэффициент передачи K_0=1 и постоянную времени T_0 =0,7 с. Данное звено охвачено единичной обратной связью, реализующей следящую систему управления.

Рассчитаем параметры ПИД-регулятора, используя метод Циглера–Никольса [31]. Так как регулятор работает только в режиме поддержания температуры, характеристика переходного процесса реакции системы на

остывание запаздывания выходной характеристики практически не имеет. Параметры микропроцессорного регулятора температуры ТРМ-101-СР имеют ограниченный диапазон значений, обусловленный разрядностью встроенного АЦП и таймеров/счетчиков. Чтобы числовые значения параметров не сильно различались в разрядной сетке зададимся временем запаздывания совместимым по значению с постоянной времени объекта – $К_з$=0,6 с.

В соответствии с коэффициентами методом настройки по переходной характеристике метода Циглера-Никольса имеем:

$$k_p = \frac{1.2 \cdot T}{k \cdot \tau} = \frac{1.2 \cdot 0.7}{1 \cdot 0.6} = 1.4; \quad (4.1)$$

$$T_i = 2 \cdot \tau = 2 \cdot 0.6 = 1.2; \quad (4.2)$$

$$T_d = 0.5 \cdot \tau = 0.5 \cdot 0.6 = 0.3. \quad (4.3)$$

Проведем аналогичный расчет с использованием встроенного в MATLAB пакетом PID Tuner. Модель установки со стандартными настройками ПИД-регулятора, которая приведена на рисунке 4.3, при отклонении температуры плиты от заданной на 3 градуса (в регуляторе установлена зона нечувствительности 2 градуса) имеет переходный процесс, представленный на рисунке 4.4.

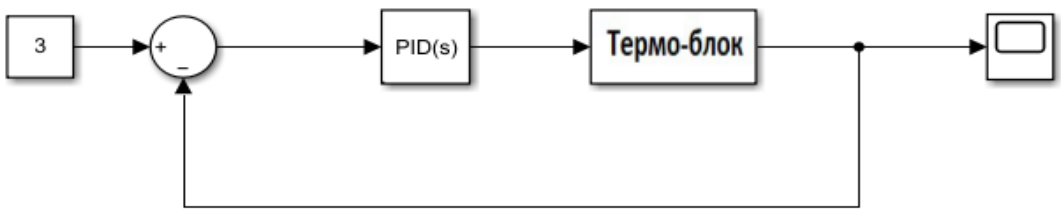


Рисунок 4.3 -Модель установки со стандартными настройками ПИД-регулятора

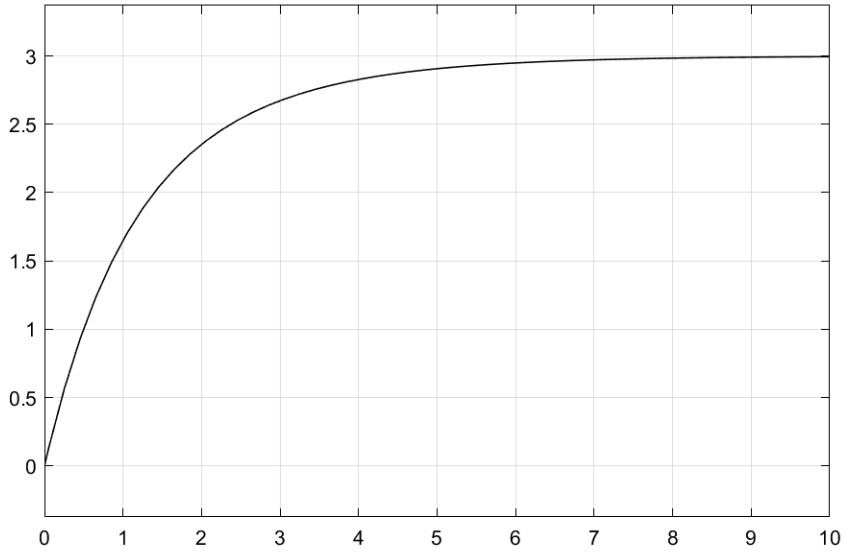


Рисунок 4.4 – Переходный процесс модели установки со стандартными настройками ПИД-регулятора

Характер переходного процесса полностью устраивает, но время необходимо сократить, как минимум до нерегулируемого значения скорости нагрева, т.е. до 3 секунд. Для этого открываем окно настройки ПИД-регулятора [59] как представлено на рисунке 4.5.

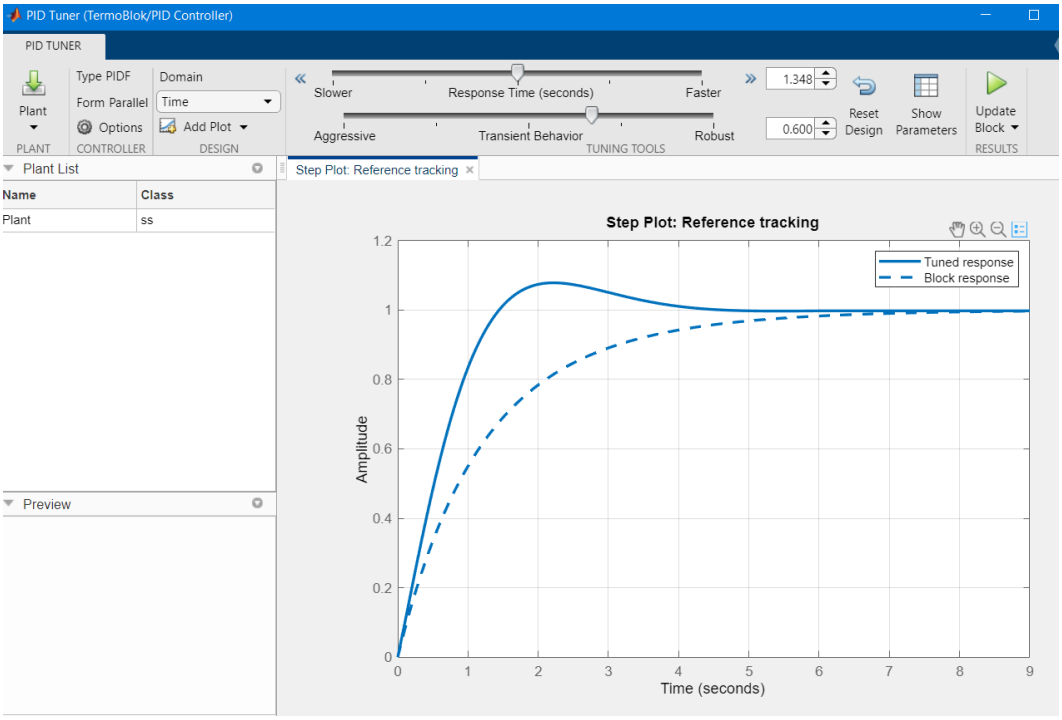


Рисунок 4.5 – Окно настройки ПИД-регулятора

Автоматическая настройка параметров регулятора нас не устраивает как по времени, так и по наличию перерегулирования. Поэтому пробуем настроить параметры регулятора вручную так, как показано на рисунке 4.6.В итоге получаем желаемую характеристику, при которой параметры ПИД-регулятора имеют следующие величины, представленные на рисунке 4.7.

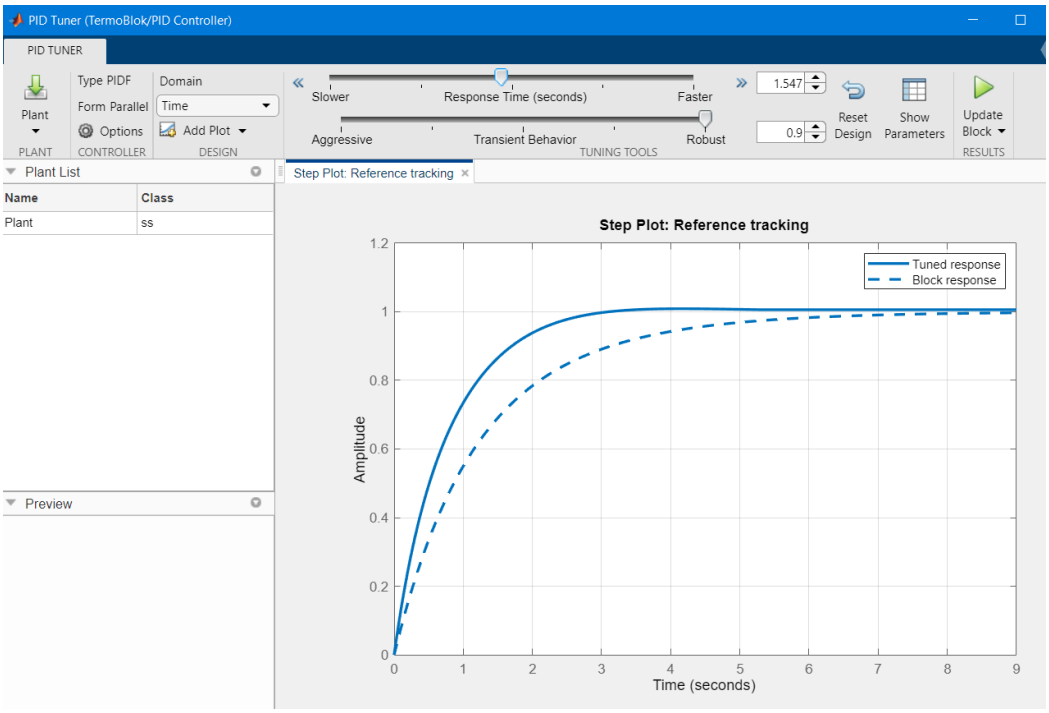


Рисунок 4.6 – Окно настройки ПИД-регулятора с результатами ручной настройки

Посмотрим результат произведенных расчетов. Для этого запустим параллельно расчет модели установки с двумя регуляторами так, как представлено на рисунке 4.8. Результаты моделирования показывают, что оба метода обеспечивают требуемые динамические показатели работы системы управления температурой (рисунок 4.9).

Show Parameters

Controller Parameters

	Tuned	Block
P	1.4841	1
I	1.4419	0.75
D	0.11944	0
N	2.224	100

Performance and Robustness

	Tuned	Block
Rise time	1.63 seconds	3.01 seconds
Settling time	2.54 seconds	5.73 seconds
Overshoot	0.88 %	0 %
Peak	1.01	0.999
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	90 deg @ 1.29 rad/s	93 deg @ 0.791 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рисунок 4.7 – Окно параметров ПИД-регулятора при настройке в ручном режиме

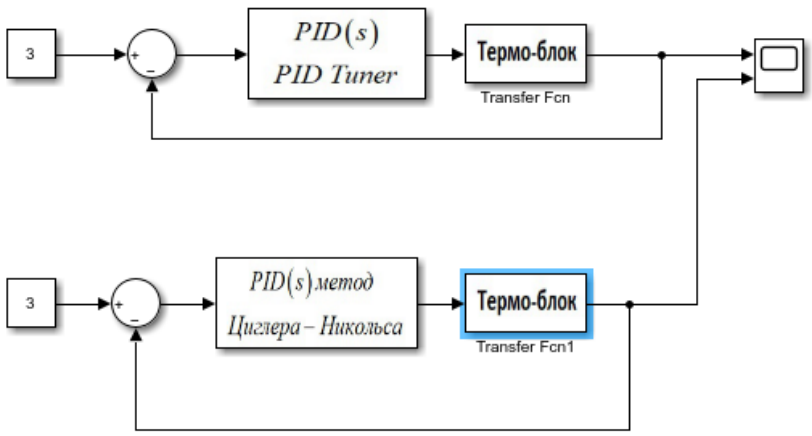


Рисунок 4.8 – Структурная схема модели установки с двумя различными регуляторами

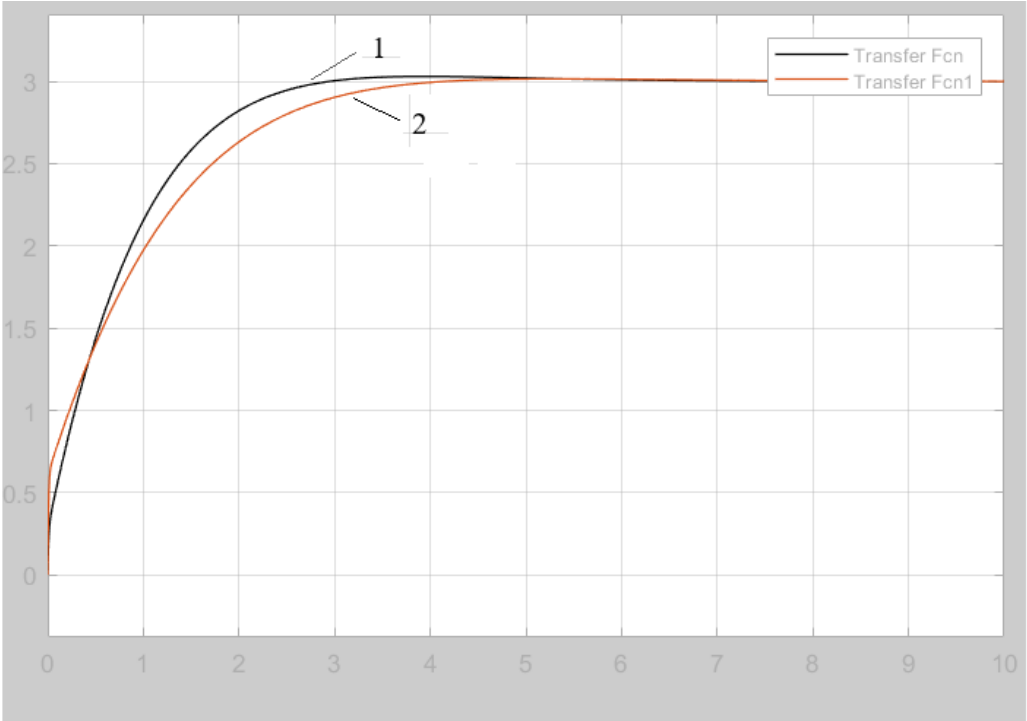


Рисунок 4.9 – Переходные процессы моделей установки:
1) при ручной настройке ПИД-регулятора в MatLabe; 2) при настройке ПИД- регулятора по методу Циглера-Никольса.

Итак, для установки параметров ПИД-регулятора переходим в ручной режим и поэтапно настраиваем нужные значения параметров регулятора. Ограничение выходной величины сигнала управления и ее диапазон пересчитываются автоматически в зависимости от выбора типа выходного сигнала.

4.3. Структуры программного обеспечения и алгоритмы программного управления модулями установки

Структура программного обеспечения и алгоритм программного управления транспортного модуля

Транспортный модуль включает в свой состав как быстродействующие электромеханические элементы (шаговый двигатель со встроенным драйвером), инкрементальный импульсный энкодер, оптический пролётный

датчик начального положения координаты поворота и координаты выдвижения, так и сравнительно инерционный генератор вакуума и датчик вакуума. Транспортный модуль представляет собой двух координатный манипулятор с вакуумной присоской в качестве рабочего органа.

Манипулятор работает в полярной системе координат, т.е. положение рабочего органа (Р) описывается величиной угла поворота от исходного положения (Ф) и расстоянием от центра вращения манипулятора (ρ). В качестве пояснения дан рисунок 4.10 [12].

Транспортный модуль предназначен для обеспечения позиционирования рабочего органа в ряде точек на рабочей плоскости, а также факта фиксации и расфиксации полупроводниковых подложек (далее подложек) в этих точках. Данные точки зафиксированы за конкретными технологическими позициями: загрузки подложек, центрифугирования и нанесения фоторезиста или иного полимера, термообработки, термостабилизации и выгрузки подложек. Алгоритм программного управления транспортным модулем представлен на рисунке 4.11.

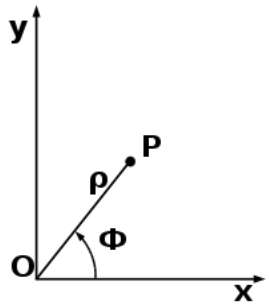


Рисунок 4.10 - Определение положения рабочего органа в полярной системе координат манипулятора

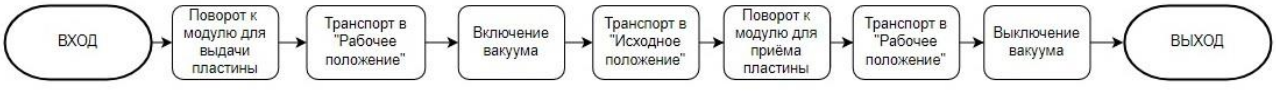


Рисунок 4.11 - Схема алгоритма программы управления транспортного модуля

Важно наличие процедуры и элементов программного интерфейса для задания, настройки и сохранения координат рабочего органа в указанных

технологических позициях, а также для проведения пусконаладочных и любых регламентных работ на установке.

Важно следить за наличием подложки на рабочем органе манипулятора, постоянно в течение всех транспортных операций. Если подложка исчезает с рабочего органа в течение транспортной операции, то должна срабатывать блокировка «НЕТ П/П ПОДЛОЖКИ НА МАНИПУЛЯТОРЕ».

Исходным положением, принимаемое за начало отсчета координаты Ф (Ф=0), принимается позиция загрузки подложек, положение которой задается датчиком исходного положения координаты поворота.

Датчиком исходного положения координаты выдвижения указывается начальное положение координаты выдвижения манипулятора **ρ** (**ρ**=0).

Управление фиксацией и расфиксацией подложки на рабочем органе осуществляется с помощью включения и выключения генератора вакуума. Определения факта фиксации и наличия подложки на рабочем органе, а также факта расфиксации (отсутствия подложки) осуществляется с помощью датчика вакуума.

Главным условием является требование недопустимости совершения манипулятором более одного оборота (Ф < 360◦) для исключения перекручивания проводов и выхода транспортного модуля из строя. Для этого введён датчик конечного положения. При получении сигнала от этого датчика нужно изменить направление вращения манипулятора на противоположное.

Изменение координаты Ф осуществляется поворотом манипулятора вокруг своей оси. Поворот осуществляется с помощью шагового двигателя фирмы Festo со встроенным драйвером.

Для управления шаговым двигателем используются сигналы «ТМ. ШАГ» и «ТМ. НАПРАВЛЕНИЕ». Для формирования этих сигналов, а также опроса состояния датчиков «ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ» и «ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ» назначен ПЛК фирмы Siemens.

Поворот манипулятора будет заблокирован до момента, пока координата выдвижения ρ не равна нулю, т.е. отсутствует сигнал с датчика «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ». Изменение координаты ρ выполняется выдвижением рабочего органа манипулятора вдоль прямой проходящей через ось манипулятора. Выдвижение осуществляется с помощью мотор-редуктора. Обратная связь по положению выполнена с применением импульсного инкрементального энкодера, соединенного с первичным валом мотор-редуктора. Распознавание начального положения выполняется датчиком «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ».

Управление мотор - редуктором выполняется через блок BMD производства фирмы «Электропривод» [103] и специально разработанным для него программным обеспечением на основе подхода, изложенного в [13]. Входными сигналами для блока BMD являются сигналы «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ПУСК/СТОП» и «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. НАПРАВЛЕНИЕ». Для формирования этих сигналов выбран ПЛК фирмы Siemens. Сигнал с импульсного инкрементного энкодера также поступает на ПЛК фирмы Siemens.

Для транспортного модуля разработана разрядная сетка, которая приведена в таблице 4.3, а на рисунке 4.12 приведена циклограмма транспортного модуля [12].

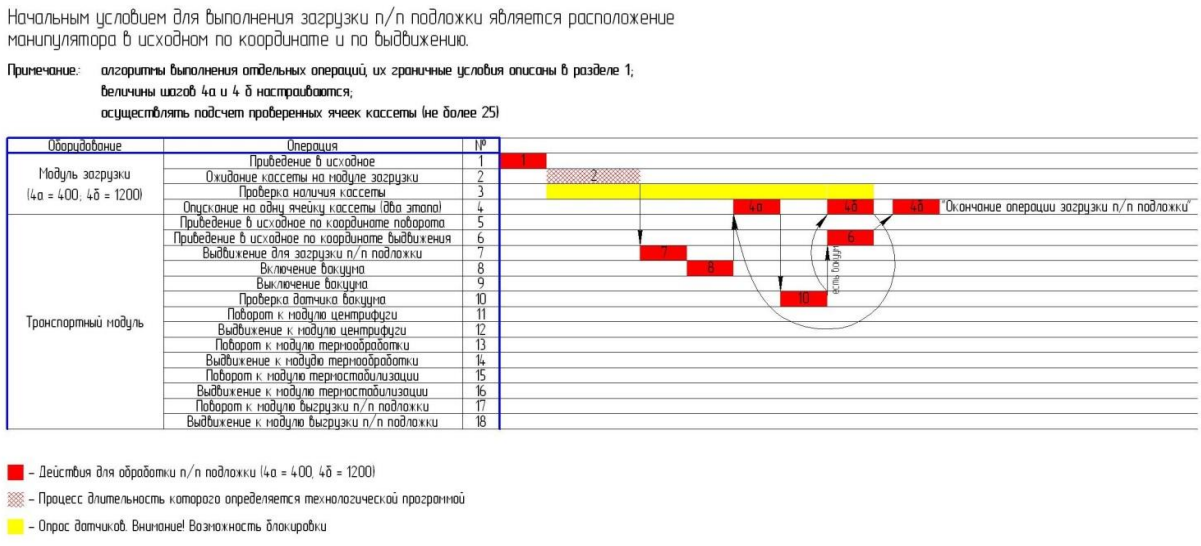


Рисунок 4.12 - Циклограмма транспортного модуля

Таблица 4.3 - Разрядная сетка для транспортного модуля

№п п	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источник сигнала	Приемник сигнала
1	ТМ. ПОВОРОТ. ШАГ	1 импульс = 1 шаг ШД (с учетом дробления шага)	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Драйвер ШД
2	ТМ. ПОВОРОТ. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления вращения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Драйвер ШД
3	ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ	Датчик исходного положения	«0»	Датчик	ПЛК
4	ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ	Датчик конечного положения	«0»	Датчик	ПЛК
5	ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ПУСК/СТОП	Пуск или стоп мотор-редуктора на выдвижение	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Блок BMD
6	ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления выдвижение	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Блок BMD
7	ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ	Датчик исходного положения	«0»	Датчик	ПЛК
8	ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ЭНКОДЕР	Импульсы с энкодера на валу двигателя	Фронт импульсного сигнала	Энкодер	ПЛК
9	ТМ. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ	Включение клапана эжектора	«1»=ВКЛ. «0»=ВЫКЛ.	Плата ввода-вывода	Эжектор
10	ТМ. ВАКУУМ. ДАТЧИК	Факт наличия вакуума	«0»	Датчик вакуума	Плата ввода-вывода

Для режима диагностика, необходимо обеспечить возможность выполнения следующих команд и индикацию следующих величин:

1. Манипулятор в исходное - по этой команде необходимо сначала осуществить перемещение рабочего органа до датчика «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ.

ИСХОДНОЕ», а затем осуществить поворот против часовой стрелки до датчика «ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ». Перед началом каждого перемещения по любой координате необходимо проверить наличие сигнала от датчика исходного положения для данной координаты. Алгоритм поиска датчика исходного положения по любой координате должен обеспечивать точное, устойчивое, надежное и воспроизводимое позиционирование в исходном положении.

2. Поворот в исходное - данная команда подразумевает поворот на малой скорости до получения сигнала с одного из датчиков: ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ или ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ.

В случае срабатывания датчика ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ цель достигнута.

В случае срабатывания датчика ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ, необходимо изменить направление движения по координате поворота на противоположное и двигаться до срабатывания датчика ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ.

Первоначальное направление движения выбирается при отладке.

3. Выдвижение в исходное – данная команда подразумевает перемещение рабочего органа манипулятора до срабатывания датчика ТМ.ВЫДВИЖЕНИЕ.ИСХОДНОЕ.

4. Поворот - данная команда подразумевает поворот на указанное количество шагов ШД. Положительные значения означают поворот по часовой стрелке, отрицательные - против часовой стрелки.

5. Выдвижение - данная команда подразумевает перемещение рабочего органа манипулятора по координате выдвижения на указанное количество шагов(импульсов с датчика - энкодера). Положительные значения означают выдвижение от датчика исходного положения, а отрицательные - движение по направлению к датчику исходного положения по данной координате.

6. Включение/выключение вакуума. Визуальное отображение назначения элемента управления должно соответствовать действию, которое будет выполнено при активации данного элемента управления.

7. Вывод состояния датчика «ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ»

8. Вывод состояния датчика «ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ»

9. Вывод состояния датчика «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ»

10. Вывод состояния датчика «ТМ. ВАКУУМ»

Структура программного обеспечения и алгоритм программного управления модуля лифта загрузки подложек

Модуль лифта загрузки подложек (далее загрузчик) применяется для перемещения очередной необработанной подложки в рабочую плоскость транспортного модуля. Алгоритм программного управления транспортным модулем загрузчика представлен на рисунке 4.13.

Загрузчик состоит из исполнительного устройства – шагового двигателя со встроенным драйвером фирмы Festo, двух геркон - датчиков: датчик верхнего положения («ЗАГРУЗЧИК. ВВЕРХУ»), датчик нижнего положения («ЗАГРУЗЧИК. ВНИЗУ») и оптического пролетного датчика наличия кассеты на столе загрузчика («ЗАГРУЗЧИК. КАССЕТА»).

Перемещение загрузчика осуществляется вдоль вертикальной оси по средствам шагового двигателя фирмы Festo со встроенным драйвером.

Для управления шаговым двигателем загрузчика используются сигналы «ЗАГРУЗЧИК. ШАГ» и «ЗАГРУЗЧИК. НАПРАВЛЕНИЕ».

Для формирования этих сигналов, а также опроса состояния датчиков выбран ПЛК фирмы Siemens.

Движение загрузчика запрещено до тех пор, пока координата выдвижения транспортного модуля **ρ** не равна нулю, т.е. отсутствует сигнал с датчика «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ».

Разрядная сетка для модуля загрузки подложек приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Разрядная сетка для модуля загрузки подложек

№ пп	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источник сигнала	Приемник сигнала
1	ЗАГРУЗЧИК. ШАГ	1 импульс = 1 шаг ШД (с учетом дробления шага)	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Драйвер ШД
2	ЗАГРУЗЧИК. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления вращения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Драйвер ШД
3	ЗАГРУЗЧИК. ВВЕРХУ	Датчик верхнего положения	«0»	Датчик	ПЛК
4	ЗАГРУЗЧИК. ВНИЗУ	Датчик нижнего положения	«0»	Датчик	ПЛК
5	ЗАГРУЗЧИК. КАССЕТА	Датчик наличия кассеты на столике загрузчика.	Фронт импульсного сигнала	Датчик	ПЛК

Для режима «диагностика» нужно иметь рабочие команды и индикацию величин:

1. Загрузчик в исходное – данная команда означает перемещение до датчика «ЗАГРУЗЧИК. ВВЕРХУ».

2. Перемещение загрузчика - данная команда означает перемещение на заданное количество шагов.

Перед началом каждого перемещения необходимо проверить наличие сигнала от датчика исходного положения для данной координаты.

3. Вывод состояния датчика «ЗАГРУЗЧИК. ВВЕРХУ»

4. Вывод состояния датчика «ЗАГРУЗЧИК. ВНИЗУ»

5. Вывод состояния датчика «ЗАГРУЗЧИК. КАССЕТА»

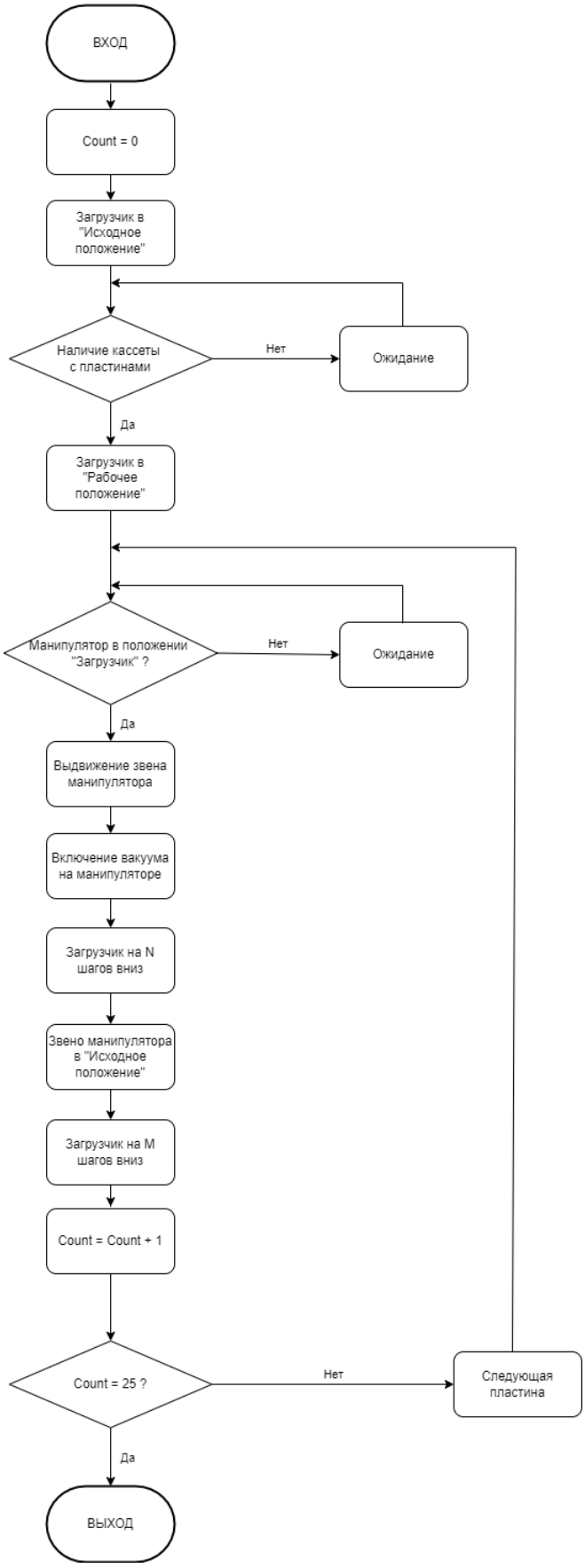


Рисунок 4.13 - Схема алгоритма программы управления модулем загрузчика

Структура программного обеспечения и алгоритм программного управления модуля приёмки подложек

Модуль приемки подложек (далее приемник) используется для перемещения очередной свободной ячейки приемной кассеты в рабочую плоскость транспортного модуля для приема обработанной подложки. Алгоритм программного управления модулем приёмки подложек представлен на рисунке 4.14.

Модуль приемки включает в себя исполнительное устройство - шаговый двигатель со встроенным драйвером фирмы Festo, два геркон - датчика: датчик верхнего положения («ПРИЕМНИК. ВВЕРХУ»), датчик нижнего положения («ПРИЕМНИК. ВНИЗУ») и оптический пролетный датчик наличия кассеты на столике загрузчика («ПРИЕМНИК. КАССЕТА»).

Перемещение приемника происходит вдоль вертикальной оси по средствам шагового двигателя фирмы Festo со встроенным драйвером.

Для управления шаговым двигателем загрузчика используются сигналы «ПРИЕМНИК. ШАГ» и «ПРИЕМНИК. НАПРАВЛЕНИЕ».

Для того, чтобы формировать выше указанные сигналы, а также проводить опрос состояния датчиков выбран ПЛК фирмы Siemens.

Движение загрузчика запрещается до момента, когда координата выдвижения транспортного модуля ρ не равна нулю, т.е. когда отсутствует сигнал с датчика «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ».

Разрядная сетка для модуля приемки подложек приведена в таблице 4.5.

Для режима «диагностика» нужно иметь рабочие команды и индикацию величин:

1. Приемник в исходное – данная команда означает перемещение до датчика «ПРИЕМНИК. ВНИЗУ». Перед началом каждого перемещения нужно выполнять проверку на наличие сигнала от датчика исходного положения.

2. Перемещение приемника - данная команда означает перемещение на заданное количество шагов.

3. Вывод состояния датчика «ПРИЕМНИК. ВВЕРХУ»

4. Вывод состояния датчика «ПРИЕМНИК. ВНИЗУ»

5. Вывод состояния датчика «ПРИЕМНИК. КАССЕТА»

Таблица 4.5 - Разрядная сетка для модуля приемки подложек

№ пп	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источник сигнала	Приемник сигнала
1	ПРИЕМНИК. ШАГ	1 импульс = 1 шаг ШД (с учетом дробления шага)	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Драйвер ШД
2	ПРИЕМНИК. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления вращения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Драйвер ШД
3	ПРИЕМНИК. ВВЕРХУ	Датчик верхнего положения	«0»	Датчик	ПЛК
4	ПРИЕМНИК. ВНИЗУ	Датчик нижнего положения	«0»	Датчик	ПЛК
5	ПРИЕМНИК. КАССЕТА	Датчик наличия кассеты на столике загрузчика.	Фронт импульсного сигнала	Датчик	ПЛК

Структура программного обеспечения и алгоритм программного управления модуля инструмента

Модуль инструмента (далее инструмент) разработан для вывода дозирующей головки в центр пластины (или сканирования по площади пластины) в зависимости от выбранного режима работы модуля для нанесения фоторезиста на подложку и (или) отмывки растворителем краевого валика подложки. Алгоритм программного управления модулем инструмента показан в обобщенном алгоритме программного управления совместной работы с модулем центрифуги на рисунке 4.15.

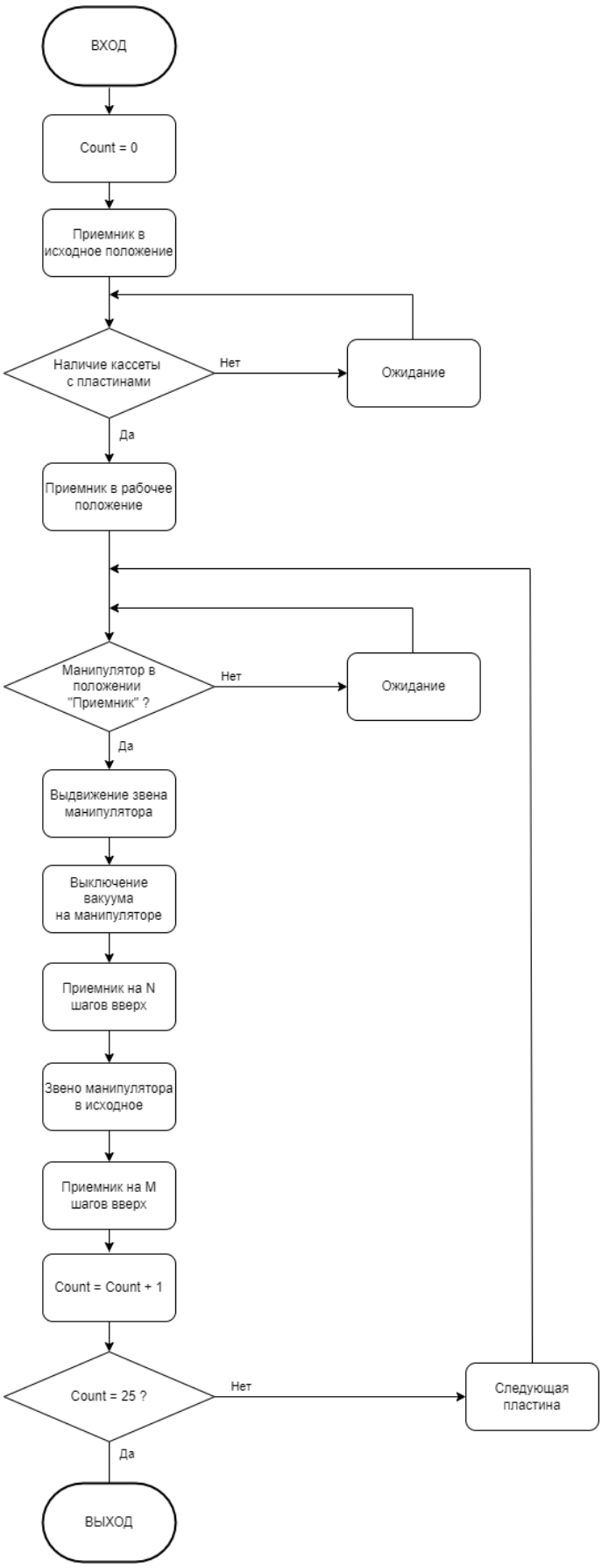


Рисунок 4.14 - Схема алгоритма программы управления модулем приёмки подложек

Модуль инструмента дозирования состоит из исполнительных устройств - пневмоциллиндра, который управляется распределителем фирмы Festo, и шагового двигателя со встроенным драйвером фирмы Festo, двух геркон - датчиков: датчик верхнего положения («ИНСТРУМЕНТ. ПОДЪЕМ. ВВЕРХУ»), датчик нижнего положения («ИНСТРУМЕНТ. ПОДЪЕМ. ВНИЗУ») и оптического пролетного датчика исходного положения («ИНСТРУМЕНТ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ»).

Движение инструмента осуществляется вдоль вертикальной оси (два положения) и поворотом вокруг вертикальной оси. Подъем и опускание вдоль вертикальной оси происходит за счёт пневмоциллиндра, а поворот происходит за счёт работы шагового двигателя фирмы Festo, со встроенным драйвером [124].

Для управления шаговым двигателем загрузчика используются сигналы «ИНСТРУМЕНТ. ПОВОРОТ. ШАГ» и «ИНСТРУМЕНТ. ПОВОРОТ. НАПРАВЛЕНИЕ», а также сигнал на распределитель «ИНСТРУМЕНТ. ПОДЪЕМ. ВВЕРХ». Для того, чтобы получить выше перечисленные сигналы, а также провести опрос состояния датчиков, назначен ПЛК фирмы Siemens и плата ввода-вывода фирмы Advantech [86].

Движение инструмента по координате поворота вокруг вертикальной оси запрещается до момента, пока координата подъема модуля инструмента не равна нулю, т.е. отсутствует сигнал с датчика «ПРИЕМНИК. ПОДЪЕМ. ВНИЗУ».

Разрядная сетка для модуля инструмента приведена в таблице 4.6.

Для режима «диагностика» нужно иметь рабочие команды и индикацию величин:

1. Инструмент в исходное - данная команда означает перемещение по координате поворот до датчика «ИНСТРУМЕНТ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ».

2. Поворот инструмента - данная команда означает перемещение по координате поворота на заданное количество шагов.

Движение инструмента по координате поворота вокруг вертикальной оси запрещается до момента, пока координата подъема модуля инструмента не равна нулю, т.е. нет сигнал с датчика «ПРИЕМНИК. ПОДЪЕМ. ВНИЗУ».

3. Подъем/опускание инструмента - данная команда означает включить/выключить распределитель пневмоциллиндра. Проверить выполнение команды по состоянию соответствующего датчика.

4. Вывод состояния датчика «ИНСТРУМЕНТ. ПОДЪЕМ. ВВЕРХУ»

5. Вывод состояния датчика «ИНСТРУМЕНТ. ПОРДЪЕМ. ВНИЗУ»

6. Вывод состояния датчика «ИНСТРУМЕНТ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ»

Таблица 4.6 - Разрядная сетка для модуля инструмента

№ пп	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источ-ник сигнала	Приемник сигнала
1	ИНСТРУМЕНТ ПОВОРОТ. ШАГ	1 импульс = 1 шаг ШД (с учетом дробления шага)	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Драйвер ШД
2	ИНСТРУМЕНТ ПОВОРОТ. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления вращения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Драйвер ШД
3	ИНСТРУМЕНТ ПОДЪЕМ. ВВЕРХ	Подъем/Опускание инструмента	«1» = вверх «0» = вниз	Плата ввода вывода	Распредели-тель пневмоцил-линдра
4	ИНСТРУМЕНТ ПОДЪЕМ. ВВЕРХУ	Датчик верхнего положения	«0»	Датчик	ПЛК
5	ИНСТРУМЕНТ ПОДЪЕМ. ВНИЗУ	Датчик нижнего положения	«0»	Датчик	ПЛК
6	ИНСТРУМЕНТ ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ	Датчик наличия кассеты на столике загрузчика.	Фронт импульсного сигнала	Датчик	ПЛК

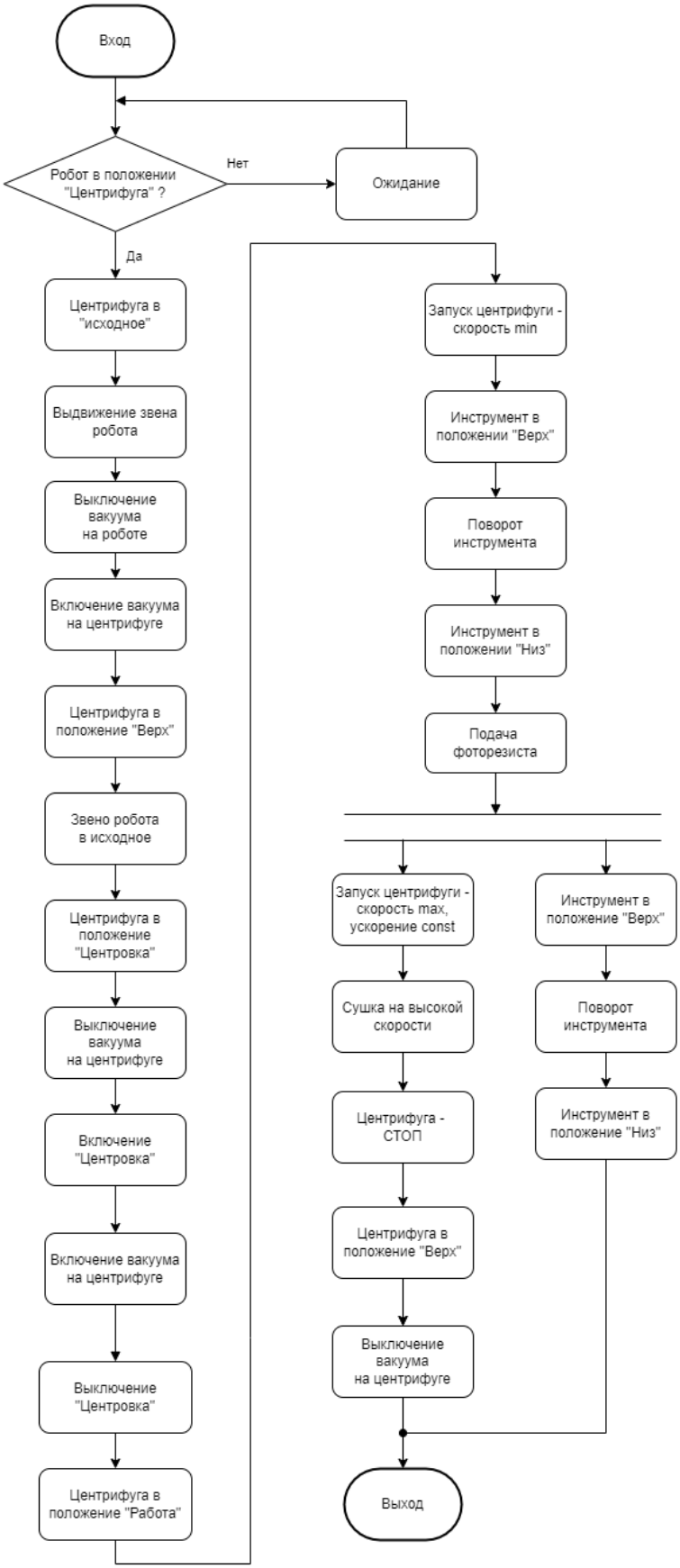


Рисунок 4.15 - Схема алгоритма программы управления модулями центрифуги и инструмента дозирования

Структура программного обеспечения блока клапанов

Блок клапанов выделяют в отдельный блок в системе управления, однако по функциональным критериям он относится к модулю инструмента дозирования. Блок клапанов необходим для подачи и дозирования технологических сред для обработки подложек. Блок клапанов включает в себя: клапан подачи азота, клапан подачи растворителя, дозатор. Управление клапанами происходит через платы ввода-вывода. Разрядная сетка блока клапанов приведена в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Разрядная сетка блока клапанов

№п п	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источник сигнала	Приемник сигнала
1	КЛАПАН ПОДАЧИ АЗОТА	Открытие клапана подачи азота	«0»	Плата ввода вывода	Объединительная плата блока клапанов
2	КЛАПАН ПОДАЧИ РАСТВОРИТЕЛЯ	Открытие клапана подачи растворителя	«0»	Плата ввода вывода	Объединительная плата блока клапанов
3	КЛАПАН ДОЗАТОРА	Включение дозатора	«0»	Плата ввода вывода	Объединительная плата блока клапанов
4	ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА	Определение	«0»	Датчик давления воздуха	Плата ввода-вывода

На рисунке 4.16 приведена циклограмма работы модуля центрифугирования.

Конструкция и подход к разработке программного обеспечения модуля центрифугирования достаточно подробно рассмотрены в главах 2 – 3.

Рисунок 4.16 - Циклограмма модуля центрифугирования

Структура программного обеспечения и алгоритм программного правления модуля термообработки

Модуль термообработки (далее модуль ТО) применяется для термической обработки подложки с нанесённым фоторезистом. В состав модуля входят два основных узла: устройство подъема/опускания/фиксации подложки и нагреватель. Алгоритм программного управления транспортным модулем загрузчика представлен на рисунке 4.17.

Управление нагревателем осуществляется с помощью ПИД-регулятора ТРМ-101-СР фирмы ОВЕН [88].

Уставка температуры и параметры регулирования для ПИД-регулятора передаются от промышленного компьютера через преобразователь USB- RS-485.

Исполнительным устройством является линейный актуатор фирмы «Электропривод» на базе шагового двигателя.

В состав исполнительного устройства входит оптический пролетный датчик начального положения «ТО. ИСХОДНОЕ», а также генератор вакуума с вакуумным датчиком.

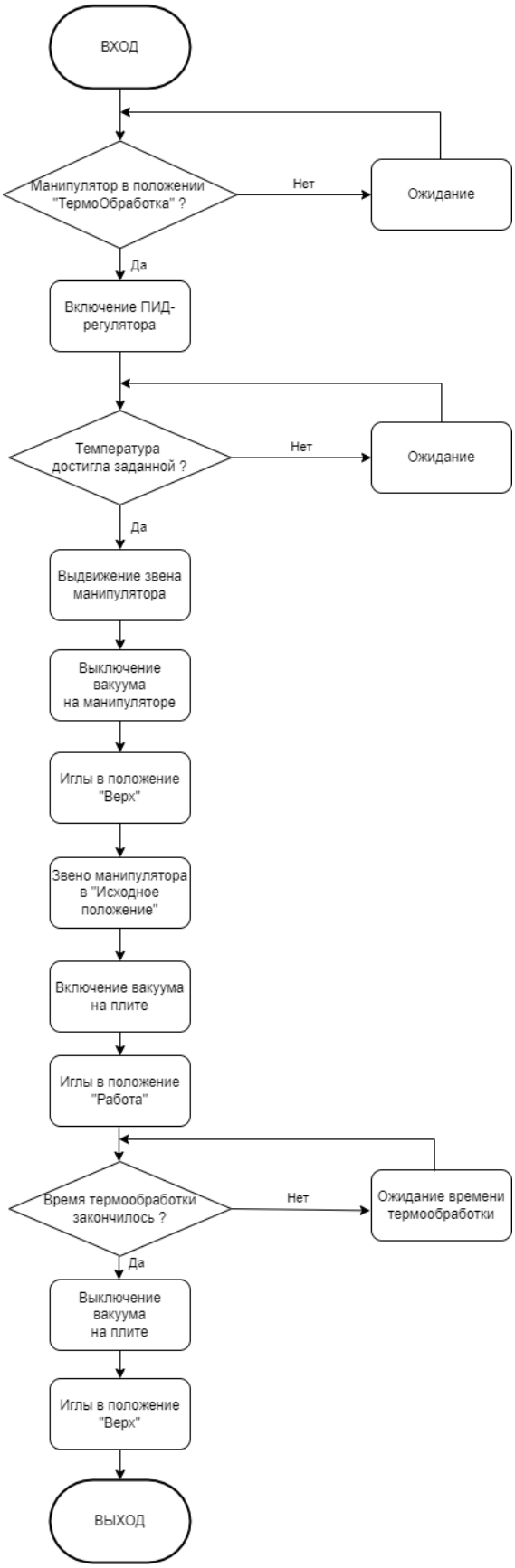


Рисунок 4.17 - Схема алгоритма программы управления модулем термообработки

Для управления шаговым двигателем линейного актуатора используется блок управления ШД - SMSD-1.5 фирмы «Электропривод», управляющими сигналами для которого есть «ТО. ШАГ», «ТО. НАПРАВЛЕНИЕ», «ТО. РАЗРЕШЕНИЕ» [103].

По фронту сигнала «ТО.ШАГ» шаговый двигатель актуатора поворачивает ротор на один шаг, при изменении сигнала «ТО. НАПРАВЛЕНИЕ» направление вращения ШД линейного актуатора меняется на противоположное, при отсутствии сигнала «ТО. РАЗРЕШЕНИЕ» снимается напряжение с обмоток ШД. Таким образом, в те промежутки времени, когда устройство подъема/опускания/фиксации подложки не используется, для уменьшения нагрева ШД и экономии электроэнергии необходимо снимать сигнал «ТО. РАЗРЕШЕНИЕ». Для обеспечения фиксации подложки на модуле ТО нужно подавать сигнал «ТО. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ» на клапан генератора вакуума и проверить факт надежной фиксации подложки на модуле ТО по сигналу с датчика вакуума «ТО. ВАКУУМ». Выдвижение рабочего органа транспортного модуля на позиции термообработки при наличии подложки на рабочем органе заблокировано до момента, пока отсутствует сигнал с датчика «ТО. ИСХОДНОЕ».

Запрещается располагать подложку на горячей плите модуля термообработки до выхода на заданный температурный режим. Следует проверять наличие подложки на модуле термообработки по сигналу датчика вакуума данной позиции «ТО.ВАКУУМ», в течение всего времени обработки подложки на данной позиции. Разрядная сетка для модуля термообработки представлена в таблице 4.8. На рисунке 4.18 изображена циклограмма модуля термообработки [12].

Для режима «диагностика» нужно иметь рабочие команды и индикацию величин:

1. Иглы в исходное - данная команда означает опускание игл до датчика «ТО. ИСХОДНОЕ». Проверить выполнение команды по состоянию соответствующего датчика.

2. Фиксация подложки - данная команда означает включение генератора вакуума. Перед началом каждого перемещения по любой координате необходимо проверить наличие сигнала от датчика исходного положения для данной координаты.

3. Подъем/опускание игл - данная команда означает подъем или опускание игл на заданное количество шагов.

4. Вывод состояния датчика «ТО. ИСХОДНОЕ»

5. Вывод состояния датчика «ТО. ВАКУУМ»

Таблица 4.8 - Разрядная сетка для модуля термообработки

№п п	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источник сигнала	Приемни к сигнала
1	ТО. ПОДЪЕМ. ШАГ	1 импульс = 1 шаг ШД (с учетом дробления шага)	Фронт импульсног о сигнала	ПЛК	Драйвер ШД SMSD-1.5
2	ТО. ПОДЪЕМ. НАПРАВЛЕНИ Е	Выбор направления вращения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Драйвер ШД SMSD-1.5
3	ТО. ПОДЪЕМ. РАЗРЕШЕНИЕ	Разрешение работы драйвера SMSD-1.5	«0»	Плата ввода вывода	Драйвер IL SMSD-1.5
4	ТО. ИСХОДНОЕ	Датчик исходного положения	«0»	Датчик	ПЛК
5	ТО. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ	Вкалючение/выключ ение генератора вакуума	«1» - вкл. «0» - выкл	Плата ввода-вывода	Генерато р вакуума
6	ТО. ВАКУУМ	Датчик наличия вакуума (фиксация п/п подложки)	Фронт импульсног о сигнала	Датчик	Плата ввода-вывода

Примечание. Направление вращения: CW – подъем, CCW – опускание.

Начальным условием для проведения термообработки является наличие п/п подложки на поднятых в рабочее положение иглах ТО, манипулятор в исходном по координате выдвижения. Модуль ТО вышел на заданный температурный режим.

Примечание: алгоритмы выполнения отдельных операций, их граничные условия описаны в разделе 1.

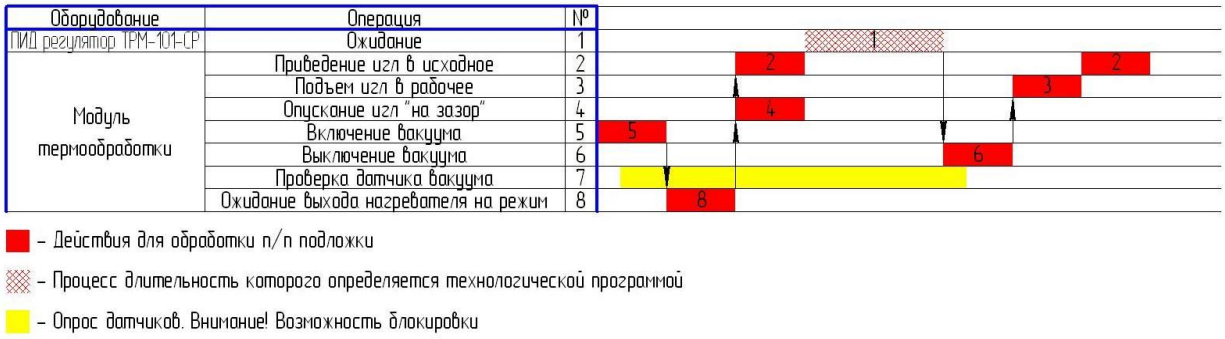


Рисунок 4.18 - Циклограмма модуля термообработки

Структура программного обеспечения и алгоритм программного управления модуля термостабилизации

Модуль термостабилизации (далее модуль ТС) необходим для охлаждения п/п подложки до заданной температуры после операции термической обработки, перед выгрузкой в приемную кассету. Алгоритм программного управления транспортным модулем загрузчика представлен на рисунке 4.19.

Модуль включает в свой состав два основных узла: устройство подъема/опускания/фиксации подложки и устройство термостатирования. Исполнительным устройством является линейный актуатор фирмы «Электропривод» на базе шагового двигателя. В состав входит оптический пролетный датчик начального положения «ТС. ИСХОДНОЕ», а также генератор вакуума с вакуумным датчиком.

Для управления шаговым двигателем линейного актуатора используется блок управления ШД - SMSD-1.5 фирмы «Электропривод» [103], управляющим сигналом для которого есть «ТС. ШАГ», «ТС. НАПРАВЛЕНИЕ», «ТС. РАЗРЕШЕНИЕ».

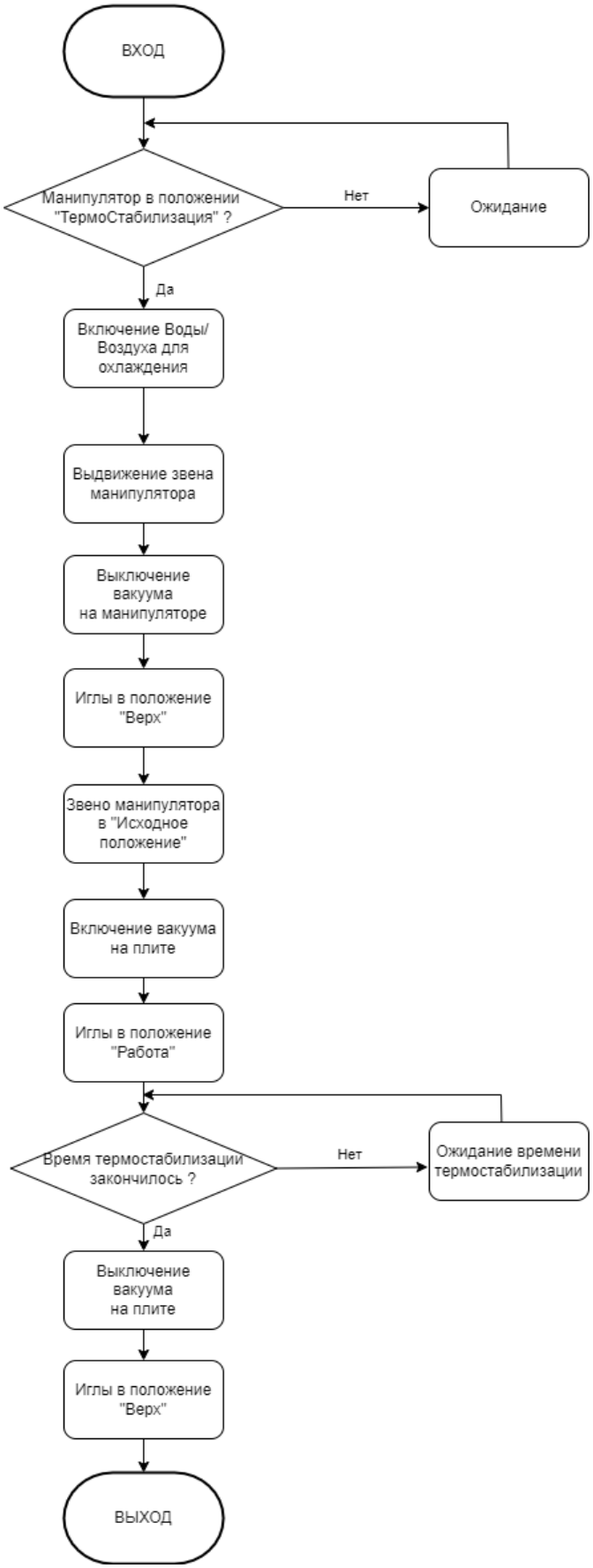


Рисунок 4.19 – Схема алгоритма программы управления модулем термостабилизации

По фронту сигнала «ТС.ШАГ» шаговый двигатель актуатора поворачивает ротор на один шаг, при изменении сигнала «ТС. НАПРАВЛЕНИЕ» направление вращения ШД линейного актуатора меняется на противоположное, при отсутствии сигнала «ТС. РАЗРЕШЕНИЕ» снимается напряжение с обмоток ШД. Таким образом, в те промежутки времени, когда устройство подъема/опускания/фиксации п/п подложки не используется, для уменьшения нагрева ШД требуется снимать сигнал «ТС. РАЗРЕШЕНИЕ».

Для того, чтобы зафиксировать подложку на модуле ТС, нужно дать сигнал «ТС. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ» на клапан генератора вакуума и проверить факт надежной фиксации п/п подложки на модуле ТС по сигналу с датчика вакуума «ТС. ВАКУУМ».

Выдвижение рабочего органа транспортного модуля на позиции термообработки при наличии п/п подложки на рабочем органе заблокировано до момента, пока отсутствует сигнал с датчика «ТС. ИСХОДНОЕ». Запрещено располагать п/п подложку на плите модуля термостабилизации до выхода термостата на заданный температурный режим. Нужно следить за наличием подложки на модуле термостабилизации по сигналу датчика вакуума данной позиции «ТС.ВАКУУМ» до конца обработки подложки на данной позиции.

Для режима «диагностика» нужно иметь рабочие команды и индикацию величин:

1. Иглы в исходное - данная команда означает опускание игл до датчика «ТС.ИСХОДНОЕ». Проверить выполнение команды по состоянию соответствующего датчика. Перед началом каждого перемещения по любой координате необходимо проверить наличие сигнала от датчика исходного положения для данной координаты.

2. Фиксация подложки - данная команда означает включение генератора вакуума. Перед началом каждого перемещения по любой координате нужно выполнить проверку на наличие сигнала от датчика исходного положения для данной координаты.

3. Подъем/опускание игл - данная команда означает подъем или опускание игл на заданное количество шагов.

4. Вывод состояния датчика «ТС. ИСХОДНОЕ»

5. Вывод состояния датчика «ТС. ВАКУУМ»

Разрядная сетка для модуля термостабилизации показана в таблице 4.9. На рисунке 4.20 изображена циклограмма модуля термостабилизации [12].

Таблица 4.9 - Разрядная сетка для модуля термостабилизации

№п п	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источ-ник сигнала	Прием-ник сигнала
1	ТС. ПОДЪЕМ. ШАГ	1 импульс = 1 шаг ШД (с учетом дробления шага)	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Драйвер ШД SMSD-1.5
2	ТС. ПОДЪЕМ. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления вращения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Драйвер ШД SMSD-1.5
3	ТС. ПОДЪЕМ. РАЗРЕШЕНИЕ	Разрешение работы драйвера SMSD-1.5	«0»	Плата ввода вывода	Драйвер IL SMSD-1.5
4	ТС. ИСХОДНОЕ	Датчик исходного положения	«0»	Датчик	ПЛК
5	ТС. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ	Вкалючение/выключение генератора вакуума	«1» - вкл. «0» - выкл	Плата ввода-вывода	Генератор вакуума
6	ТС. ВАКУУМ	Датчик наличия вакуума (фиксация п/п подложки)	Фронт импульсного сигнала	Датчик	Плата ввода-вывода

Примечание. Направление вращения: CW – подъем, CCW - опускание.

Начальным условием для проведения термостабилизации является наличие п/п подложки на поднятых в рабочее положение иглах ТС, манипулятор в исходном по координате выдвижения. Модуль ТС вышел на заданный температурный режим.

Примечание: алгоритмы выполнения отдельных операций, их граничные условия описаны в разделе 1.

– Действия для обработки п/п подложки

– Процесс длительность которого определяется технологической программой

– Опрос датчиков. Внимание! Возможность блокировки

Рисунок 4.20 - Циклограмма работы модуля термостабилизации

4.4. Структура библиотеки технологических программ, пользовательский интерфейс и блокировки

Созданная библиотека технологических программ включает в себя набор макросов, которые обеспечивают автоматическую обработку подложек с заданными характеристиками, а также процедуру записи макросов в режиме выполнения диагностических команд (режим диагностики) и в автономном режиме, выраженного в форме табличного задания.

Перечень команд и параметров, необходимых для записи в макрос, задавался как задание.

Процедура записи и сохранения макроса позволяет описывать последовательность операций с переменными параметрами (параметризируемые операции), например, таких как:

- нанесение фоторезиста (доза, время, температура фоторезиста),
- режим нанесения фоторезиста (в центр, сканирование),
- подача азота (есть или нет, время подачи),
- центрифугирования (скорости, ускорения, времена обработки),
- отмывка краевого валика (есть или нет, время отмывки),

- отмывка обратной стороны (есть или нет, время отмывки),

- термообработка (температура, время термообработки, контактно или на зазоре),

- термостабилизация (время обработки, контактно или на зазоре),

- граничные условия, условия выполнения и временные интервалы между операциями.

Транспортные операции (загрузка, выгрузка, перенос подложек) являются жёстко детерминированными по граничным условиям и условиям выполнения, таким как:

- наличие или отсутствие кассеты на столике модуля загрузки и(или) модуля приемки,

- наличие или отсутствие пластины на технологическом модуле,

- сигналы датчиков, обеспечивающих функционирование модулей.

Структура библиотеки технологических программ позволяет получить удобный доступ, выбор, просмотр описания и характеристик, а также загрузку технологических программ.

Формулировкой пользовательский интерфейс говорит о совокупности графических, текстовых и мультимедийных элементов для ввода параметров, задания команд, а также вывода параметров, основных и вспомогательных данных, выбора режима функционирования установки.

Пользовательский интерфейс позволяет управлять работой установки удобно и интуитивно даже оператору с начальным уровнем компьютерной подготовки.

Структура пользовательского интерфейса включает в себя три основные части, которые представляют собой основные режимы работы установки и программного обеспечения:

1 - режим ДИАГНОСТИКА.

Этот режим даёт возможность работать с каждым технологическим модулем установки в отдельности.

Доступ к режиму диагностики защищен паролем для того, чтобы исключить доступ к данному режиму неавторизованного персонала.

В режиме ДИАГНОСТИКА нужно, чтобы элементы управления и отображения информации, которые относятся к конкретным модулям, были соответственно сгруппированы и визуально отделены друг от друга.

Перечень команд и данных для отображения в режиме ДИАГНОСТИКА приведен в описании технологических модулей выше.

Элементы управления и отображения информации сопровождаются всплывающими подсказками (с возможностью отключения пользователем) о назначении данного элемента.

2 - режим РАБОТА.

В режиме РАБОТА имеется индикация основных параметров функционирования установки (наличие необходимого уровня давления воздуха, наличия основных технологических сред, и т.п.), а также имеется возможность срабатывания блокировок (с отображением соответствующих сообщений) и, в то же время, возможность снятия их.

Основными командами являются команды «ПУСК», «СТОП», а также элементы управления для выбора и загрузки технологической программы для работы установки.

3 - режим формирования базы технологических параметров (БТП).

Режим формирования БТП относительно понятий программного интерфейса осуществляет удобное и однозначное создание технологических программ, а также сохранение вновь созданных программ и удобный доступ к ранее созданным программам.

Доступ к режиму формирования БТП защищен паролем для того, чтобы исключить доступ к данному режиму неавторизованного персонала.

На рисунке 4.21 показаны скриншоты окон разработанного пакета ПО автоматизированной установки фоторезиста.

Рисунок 4.21 - Скриншоты окон пакета ПО автоматизированной установки нанесения фоторезиста

Хранение файлов с технологическими программами должно осуществляться в защищенной от стирания и изменения сторонним программным обеспечением структуре (в разделе жесткого диска).

Для настройки транспортной и других систем установки разработан соответствующий инструментарий, который позволяет задавать и сохранять для использования в работе программы следующие данные [12]:

- количество шагов по координате поворота от исходного до позиции нанесения фоторезиста;

- количество шагов (импульсов с энкодера) по координате выдвижения от исходного до позиции нанесения фоторезиста;

- количество шагов по координате поворота от исходного до позиции термообработки;

- количество шагов (импульсов с энкодера) по координате выдвижения от исходного до позиции термообработки;

- количество шагов по координате поворота от исходного до позиции термостабилизации;

- количество шагов (импульсов с энкодера) по координате выдвижения от исходного до позиции термостабилизации;

- количество шагов по координате поворота от исходного до позиции приемки обработанных п/п подложек;

- количество шагов (импульсов с энкодера) по координате выдвижения от исходного до позиции приемки обработанных п/п подложек;

- количество шагов для модулей закрузки и приемки п/п подложек, для обеспечения перемещения на одну ячейку кассеты (отдельно для каждого модуля);

- количество шагов для обеспечения подъема игл модулей ТО и ТС в положение от исходного до рабочего (отдельно для каждого модуля), а также количество шагов для обеспечения обработки на зазоре.

Для входа в режим настройки параметров разработан защищающий пароль. Для предотвращения и ограничения несанкционированной обработки подложки, выхода из строя каких либо фрагментов установки или наличия опасности для здоровья работающего персонала, программное обеспечение

оснащено различными блокировками. Интерфейс ПО даёт возможность выводить на экран сообщения о срабатывании блокировок. Предусматривается интерфейсом и вывод на экран информации по способу снятия блокировок. Для оператора предлагается руководство, которое включает в себя описание обработки блокировок и способы их снятия для продолжения работы.

В процессе отладки установки, а также в ходе пуско-наладочных работ на площадях заказчика перечень необходимых блокировок может варьироваться. Этот факт учтён при разработке ПО. Подразумевается возможность процедура включения или выключения блокировок, защищенная от несанкционированного применения паролем. Кроме того, отсутствие сигнала от любого из датчиков в то время, когда сигнал должен присутствовать, вызывает блокировку системы с выводом сообщения и диалогом для снятия блокировки и запроса дальнейших действий. Примеры блокировок приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Примеры блокировок

№пп	Название блокировки	Описание и способ снятия
1	Отсутствие подачи сжатого воздуха	Определяется по сигналу с датчика давления. Сопровождается включением красного индикатора состояния установки. Полностью блокирует работу установки в режиме РАБОТА. Снятие блокировки должно осуществляться в диалоге сообщения о срабатывании блокировки.
2	Отсутствие п/п пластины на рабочем органе транспортного модуля	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ТМ. ВАКУУМ. ДАТЧИК по истечении времени 1с после включения генератора вакуума на ТМ.
3	Отсутствие п/п пластины на столике центрифуги	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ЦЕНИТРФУГА. ВАКУУМ. ДАТЧИК по истечении времени 1с после включения генератора вакуума на ТМ.
4	Отсутствие п/п пластины на позиции ТО	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ТО. ВАКУУМ. ДАТЧИК по истечении времени 1с после включения генератора вакуума на ТМ.

5	Отсутствие п/п пластины на позиции ТС	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ТС. ВАКУУМ. ДАТЧИК по истечении времени 1с после включения генератора вакуума на ТМ.
6	Отсутствие загрузочной кассеты на столике модуля загрузки	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ЗАГРУЗЧИК. КАССЕТА
7	Отсутствие приемной кассеты на столике модуля приемки	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ПРИЕМНИК. КАССЕТА
8	Неприведение в исходное на этапе приведения в исходное состояние	Определяется по отсутствию сигнала с любого из датчиков исходного положения

4.5. Структура программы управления автоматизированной установкой нанесения фоторезиста

Показанная на рисунке 4.22 циклограмма позволяет получить представление о том, как соотносится работа модулей установки между собой, а также о максимально допустимых задержках и граничных условиях функционирования модулей.

С участием автора разработано ПО автоматизированной установки фоторезиста «Программа управления автоматизированной установкой нанесения фоторезиста УНФ-200А, мониторинга параметров технологического процесса, анализа и сохранения задаваемых и измеряемых данных в базу». На данное ПО получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [54].

На рисунке 4.23 показана структурная схема программы управления УНФ 200А. Она содержит 4 уровня взаимодействующих между собой модулей, связанных общим интерфейсом выбора режима работы:

1-ый уровень – реализация автоматической обработки подложек; выбор библиотеки технологических программ, формирование параметров мониторинга и режима диагностики;

2-ой уровень – подпрограмма блоков управления температурой отдельных модулей и блоки управления функциональных модулей установки;

3-ий уровень – БУ приводами и механизмами;

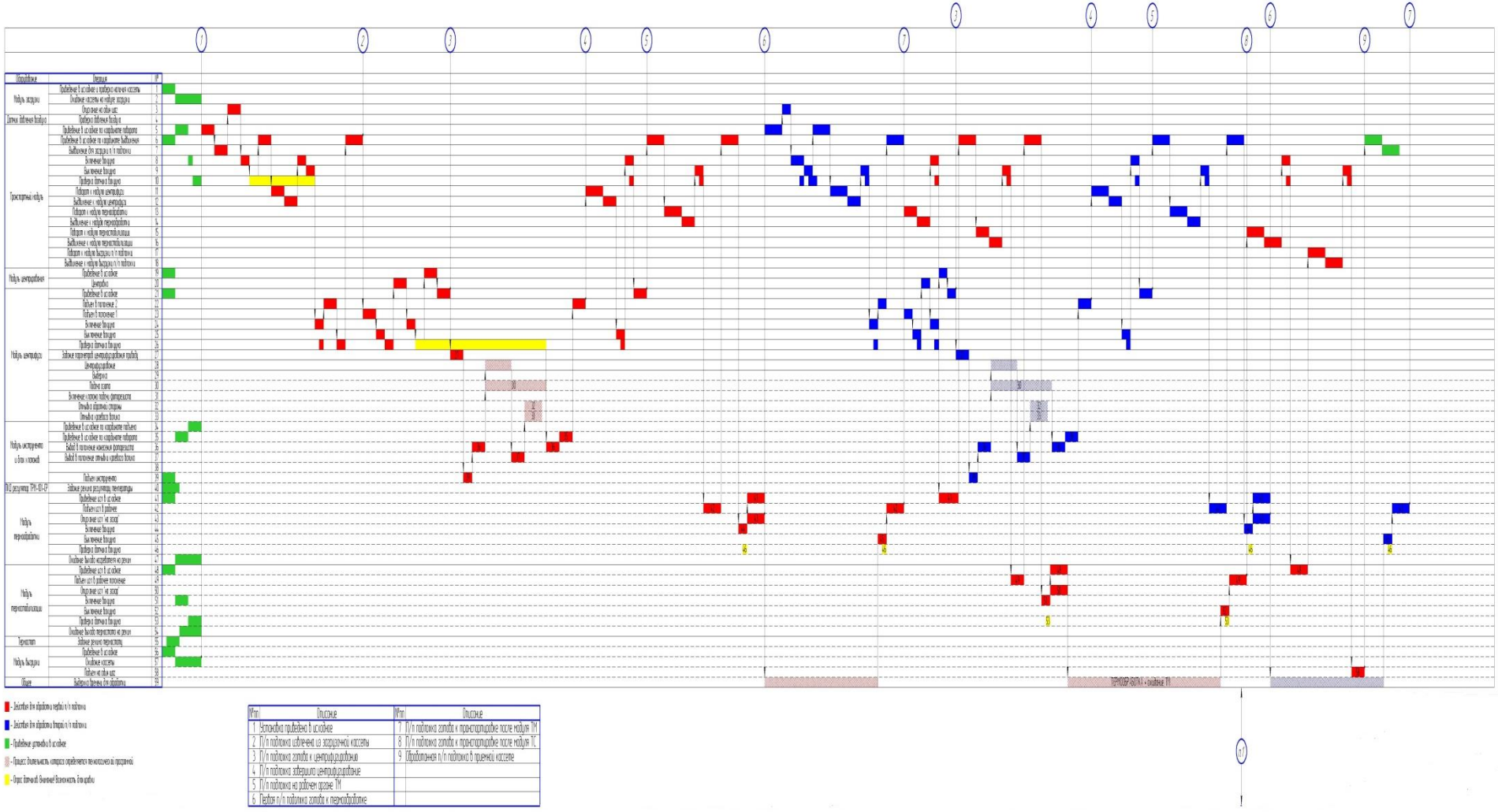
4-ый уровень – уровень контроля параметров датчиками.

Алгоритм программного управления всеми модулями установки представлен на рисунке 4.24.

Описание всех управляющих элементов и элементов отображения данных подробно изложено в соответствующей документации на разработанную автоматизированную установку нанесения фоторезиста для того, чтобы была возможность освоить их назначение и особенности функционирования любой пользователь с начальной компьютерной подготовкой.

В комплекте установки учтено наличие одной или нескольких веб-камер для визуализации процесса функционирования установки (или её отдельных модулей) на дисплее персонального компьютера, в том числе и с возможностью использования удаленного доступа, а также записи соответствующей видеоинформации в файл.

Разработанная система автоматического управления технологическим процессом нанесения фоторезиста, наличием обратной связи по скорости вращения центрифуги, а так же обратными связями по температурным параметрам модулей контроля подогрева фоторезиста, термообработки и термостабилизации, определяющих температурные параметры рабочих поверхностей и сред, которая обеспечивает возможность создания оборудования для выпуска продукции микро- и радио- электроники с высокими технологическими нормами за счёт развития моделей и алгоритмического обеспечения системы управления установки нанесения фоторезиста.



№ п/п	Описание	№ п/п	Описание
1	Установка приёмника в исходное	7	П/п подготовка заготов к термостатированию после модуля ТМ
2	П/п подготовка извлечения из загрузочной кассеты	8	П/п подготовка заготов к термостатированию после модуля ТС
3	П/п подготовка заготов к центрифугированию	9	Обработанная п/п подготовка в приемной кассете
4	П/п подготовка завершило центрифугирование		
5	П/п подготовка на рабочем органе ТМ		
6	Подбор п/п подготовка заготов к термообработке		

Рисунок 4.22 - Циклограмма работы установки

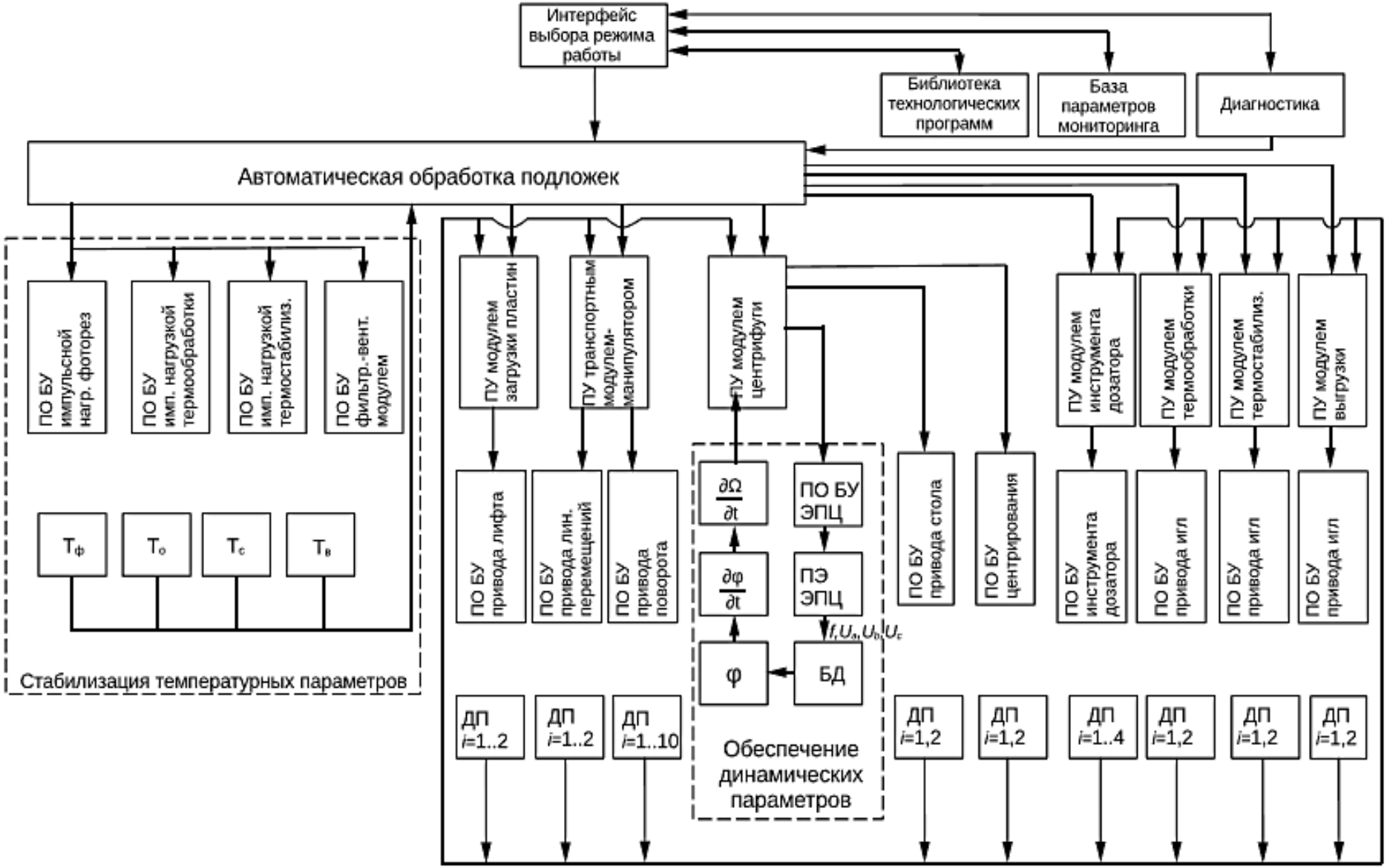


Рисунок 4.23- Структурная схема программы управления УНФ – 200А

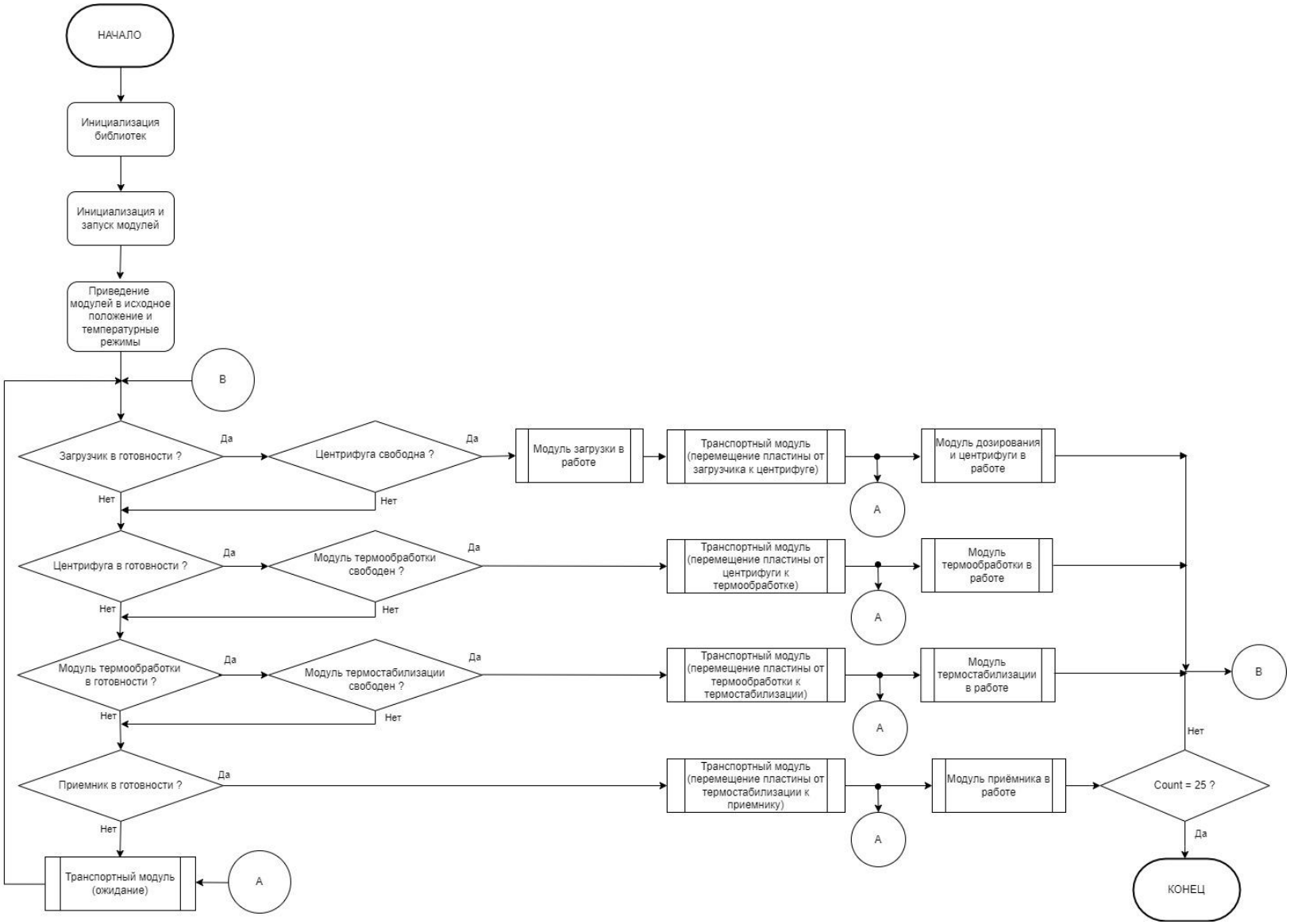


Рисунок 4.24 – Схема алгоритма программы управления модулями установки

4.6. Выводы по главе 4

Представлен состав системы автоматического управления устройством нанесения фоторезиста. Обозначено разделение исполнительных и информационных устройств: быстродействующие электромеханические устройства и датчики, требующие импульсного или аналогового управления с высокой частотой и разрешением, и сравнительно инерционные устройства, например, это пневматические (клапаны управления пневмоциллиндрами, генераторы и датчики вакуума), которые не предъявляют высоких требований к быстродействию управляющей системы.

Выбор микропроцессора как базового вычислительного элемента во многом определяет свойства модуля центрифуги. Основной особенностью процессоров, ориентированных на управление электроприводами, является наличие специальной периферийной архитектуры: генераторов ШИМ, используемых для генерации управляемых по определённому закону импульсов, питающего напряжения в обмотках БД с частотой 10÷20 кГц; преобразователей координат, позволяющих выполнять преобразования для цифровой модели из неподвижной системы, связанной с обмотками, в подвижную, связанную с ротором, и наоборот за единицы микросекунд; для обработки сигналов от датчиков имеются структуры эстиматоров скорости и АЦП с разрешением более 10 разрядов и временем преобразования менее 5 мкс.

Разработанная система автоматического управления технологическим процессом нанесения фоторезиста, отличающаяся наличием обратной связи по скорости вращения центрифуги, а так же обратными связями по температурным параметрам модулей контроля подогрева фоторезиста, термообработки и термостабилизации, определяющих температурные параметры рабочих поверхностей и сред, которая обеспечивает возможность создания оборудования для выпуска продукции микро- и радио- электроники с высокими технологическими нормами.

Комплекс алгоритмов работ модулей и алгоритм работы установки в целом, разрядные сетки обработки команд и сигналов с датчиков, а также циклограммы работы на каждый модуль и установку в целом способствовали созданию программного обеспечения для блока управления, которое представляет собой набор макросов, обеспечивающих автоматическую обработку подложек с заданными характеристиками, а также процедуру записи макросов в режиме выполнения диагностических команд и в режиме автономном, выраженном в форме табличного задания.

Основное внимание в ходе работы было уделено разработке программного обеспечения блока управления установки. В соответствии с разработанными алгоритмами автором был создан новый эффективный пакет ПО «Программа управления автоматизированной установкой нанесения фоторезиста УНФ-200А, мониторинга параметров технологического процесса, анализа и сохранения задаваемых и измеряемых данных в базу» [54].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационной работы получены следующие основные научные результаты:

1. Выполнен анализ генезиса технологии и оборудования фотолитографии, который показал, что в развитии российского оборудования неизбежным становится переход от автоматизированных линий фотолитографии на трековой платформе к комплексам оборудования на кластерной платформе; определены технологические режимы для формирования слоёв фоторезиста в интервале (10÷90) нм.

2. Разработана модель система автоматического управления процессом нанесения фоторезиста, отличающаяся наличием обратной связи по скорости вращения центрифуги, а так же обратными связями по температурным параметрам модулей контроля подогрева фоторезиста, термообработки и термостабилизации, определяющих температурные параметры рабочих поверхностей и сред, которая обеспечивает возможность создания оборудования для выпуска продукции микро- и радио- электроники с высокими технологическими нормами.

3. Создана новая методика формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающая линейный рост скорости центрифуги, т.е. позволяющей решить проблему обеспечения требуемого вида переходного процесса разгона центрифуги. Таким образом, окончательно разработан простой для микроконтроллерного исполнения алгоритм формирования управляющего сигнала запуска объекта управления с функциями обеспечения постоянного ускорения и поддержания рабочей скорости.

4. Разработана динамическая модель автоматической системы управления центрифуги, отличающаяся наличием обратной связи по скорости, обеспечивающей постоянство ускорения за счёт регулирования угла нагрузки путём опережения включения токов в статорной обмотке бесконтактного

двигателя, что позволило решить задачу обеспечения требуемой толщины и равномерности нанесения плёнки фоторезиста. В ходе работы выполнено исследование динамических характеристик режимов работы центрифуги. Установлено, что переходные процессы по скорости исключают как перерегулирование, так и экспоненциальный характер изменения скорости в конце переходного процесса, обеспечивая требуемый коэффициент линейности скоростной характеристики. Результаты моделирования и испытаний показывают количественную зависимость параметров переходных процессов электропривода центрифуги от угла нагрузки.

5. Разрядные сетки обработки команд и сигналов с датчиков, разработанные для функциональных модулей автоматизированной системы управления оборудованием нанесения фоторезиста, а также разработанные алгоритмы управления отдельными модулями оборудования и комплексный алгоритм автоматизированной установки нанесения фоторезиста, позволили создать необходимое программное обеспечение для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста, которое представляет собой набор макросов, обеспечивающих автоматическую обработку подложек с заданными характеристиками, а также процедуру записи макросов, как в режиме выполнения диагностических команд, так и автономно в форме табличного задания.

Перспективы дальнейшей разработки. Планируется совершенствование установок, относящихся к производству продукции микроэлектроники, для расширения их применения путём модернизации определённых модулей оборудования, которые позволят создать условия по объединению ряда автоматизированных установок по каждой технологической операции фотолитографии в одну единую систему на основе СМИФ.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Аббревиатуры

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БД – бесконтактный двигатель

БДПМ – бесконтактный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов

БТП – база технологических параметров

ГМДС – гексаметилдисилоксан

ГОЧ – генератор опорной частоты

ДУФ – диапазон ультрафиолета

ИС – интегральные микросхемы

КБТМ – конструкторское бюро технологических машин

М - модулятор

МДС – магнитодвижущая сила

МКЭ – метод конечных элементов

МУМ – магнитоуправляемые микросхемы

МЭМС – микроэлектромеханические системы

НИР – научно-исследовательская работа

ОС – операционная система

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

ПК – преобразователь координат

ПЛК – программируемый логический контроллер

ПМ – постоянные магниты

ПО – программное обеспечение

САУ – система автоматического управления

СБИС – сверхбольшие интегральные схемы

СМИФ – стандартный механический интерфейс

СС – сельсин

ТМ – транспортный модуль

ТО – термообработка

ТС - термостабилизация

УФ – ультрафиолет

УФП – установка формирования резистивных пленок

ФВБ – фильтровентиляционный блок

ФХУ – фоторезист с химическим усилением

ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель

ШД – шаговый двигатель

ШИМ – широтно-импульсный модулятор

ЭДС – электродвижущая сила

ЭКБ – электронная комплектующая база

ЭПЦ – электропривод центрифуги

ЭСП – электрический следящий привод

CD – Critical Dimension (критический размер)

EBR – Edge Bead Removal– (удаление краевого валика)

HHP–High-temperature Hot Plate(высокотемпературная горячая плита)

IBMPC – International Business Machines Personal Computer (персональный компьютер фирмыIBM)

IPM – Intelligent Power Module(«интеллектуальный» силовой модуль)

LHP – Low-temperature Hot Plates (низкотемпературная горячая плита)

MIPS – Microprocessorwithout Interlocked Pipeline Stages (микропроцессор без взаимосвязанных конвейерных этапов)

MTBF – Mean Time Between Failures (среднее время наработки между отказами)

MTTR – Mean Time To Repair (среднее время ремонта)

NASA – National Aeronauticsand Space Administration (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства)

PAG – Photo Acid Generator (фотокислотный генератор)

PHP – Precision Hot Plate (прецизионная горячая плита)

VLIW – Very Long Instruction Word (очень длинное слово инструкции)

WEE – Wafer Edge Exposure (экспонирование края пластины)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство СССР №723696, H 01 L 21/70, H 05 K 3/00. Устройство для прецизионного перемещения изделий / Веселов В.В., Ершов В.П., Трусова Г.Н., Улозас Р.В.К. - заявл. 20.10.1978; опубл. 23.03.80, Бюл. №11.

2. Авторское свидетельство СССР №814719, B 25 J 9/00. Манипулятор / Береговой И.З., Галкин А.Н., Годин Э.М., Кебец Л.Н., Корф Я.О., Мацкевич В.И., Шленев В.В.; заявитель и патентообладатель: Московский ордена Ленина авиационный институт им. Серго Орджоникидзе и Волжское объединение по производству легковых автомобилей. - заявл. 23.01.1979; опубл. 23.03.81, Бюл. №11.

3. Авторское свидетельство СССР №1234178, B 25 J 11/00. Манипулятор / Бармаш В.И., Бердянский М.Г., Бовкун А.Г., Бродский И.И., Кандыба Л.Ф., Клейман А.Е., Кобелев Е.А., Литвин Н.П., Овчаренко Р.И., Сачков А.И.; заявитель и патентообладатель: Днепропетровский трубопрокатный завод им. В.И. Ленина. – заявл. 01.08.1984; опубл. 30.05.86, Бюл. №20.

4. Авторское свидетельство СССР №1442393, B 25 J 11/00. Модуль манипулятора / Копп В.Я., Сергеев С.М., Харин И.Б.; заявитель и патентообладатель: Севастопольский приборостроительный институт. – заявл. 05.05.1987; опубл. 07.12.1988, Бюл. №45.

5. Авторское свидетельство СССР №1521577, B 25 J 9/16. Манипулятор / Баскарев В.В., Зинкевич С.В., Котенко А.А., Назарова В.Д., Турашева С.П. – заявл. 13.01.1988; опубл. 15.11.89, Бюл. №42.

6. Авторское свидетельство СССР №1732398, H 01 L 21/68. Устройство для подачии позиционирования полупроводниковых пластин при контроле их свойств / Куркалов И.И., Сика З.К.; заявитель и патентообладатель: Физико-энергетический институт АН ЛатвССР. – заявл. 31.07.1989; опубл. 07.05.1992, Бюл. №17.

7. Анненков А.Н., Белоусова О.В. Анализ автоматизированной установки нанесения фоторезиста как объекта управления // Вестник ТГТУ. – 2022. – Т.28. – №2. – С. 214-225.

8. Анненков А.Н., Белоусова О.В. Методика построения быстродействующего микропроцессорного регулятора система автоматического управления центрифуги со специальным видом преобразования передаточной функции // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т.18. – №6. – С. 21 - 32.

9. Анненков А.Н., Белоусова О.В. Моделирование электропривода центрифуги на базе бесконтактного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов // Научные труды КубГТУ (электронный журнал). – 2021. – №6. – С. 36-47.

10. Анненков А.Н., Белоусова О.В. Развитие моделей и алгоритмического обеспечения системы управления установки нанесения фоторезиста // Информационные системы и технологии. - 2022. - №4 (132).- С. 60 - 68.

11. Анненков А.Н., Белоусова О.В., Шиянов А.И. Разработка автоматической установки нанесения фоторезиста // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2021. – Т.17. – №3 (65). – С. 55-65.

12. Анненков А.Н., Белоусова О.В. Разработка программного обеспечения автоматизированной установки нанесения фоторезиста // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т.18. – №3. – С. 18-29.

13. Белоусова О.В., Беляков П.Ю. Разработка шагового электропривода общепромышленного назначения с электронной коммутацией. Электроэнергетика и электротехника: сборник трудов международной научно-технической конференции / отв. ред. д-р техн. наук, проф., зав. каф. Электроэнергетики Анненков А.Н. - Воронеж: АНОО ВО «Междунар. ин-т компь-ют. технологий». - 2019. - С. 132 - 135 – 175 с.

14. Белоусова О.В. Особенности программирования микропроцессорных регуляторов в MATLAB. Электроэнергетика и электротехника: сборник трудов международной научно-технической конференции / отв. ред. д-р техн. наук, проф., зав. каф. Электроэнергетики Анненков А.Н. - Воронеж: АНОО ВО «Междунар. ин-т компь-ют. технологий». – 2018. - С. 36-39 – 174с.

15. Белоусова О.В., Ситников Н.В. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. Практические задачи и примеры их решения: учебное пособие (для бакалавров). Воронеж: Международный институт компьютерных технологий. - 2017. – 85 с.

16. Белоусова О.В., Слепокуров Ю.С., Харченко А.П. Теория автоматического управления. Лабораторный практикум в среде Matlab: учеб.пособие. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». - 2018. – 106 с.

17. Белоусова О.В., Хусейн Аль Шинава, Абдулмохсин Майтам. Анализ эффективности применения обратных связей в замкнутых по положению следящих электроприводах. Электроэнергетика и электротехника: сборник научно-технических трудов международной научной конференции. Воронеж: АНОО ВО «Междунар. институт компьют. технологий». - 2017. - С. 35-38 – 126с.

18. Боднарь Д. Ультратонкие пластины как тенденция развития полупроводниковых технологий // Компоненты и технологии. Издательство Файнстрит. - 2012. - № 11. - С. 116-122.

19. Браславский И.Я., Зюзев А.М. Синтез нейронного наблюдателя для привода с прямым управлением моментом // Электротехника. - 2001. - №12. - С.31-34.

20. Валиев К. А., Раков А. В., Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике, М.: Радио и связь, 1984 – 350 с, ил.

21. Герман–Галкин С.Г., Ермилов А.С. Классификация и анализ электромеханотронных систем / С.Г. Герман–Галкин, А.С. Ермилов // Изв. вузов "Приборостроение", С.- Петербург. - 1996. - Т. 39. - № 3. - С. 13 – 21.

22. Данилов А.М. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем: моногр. / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 168 с. ISBN 978-5-9282-1036-6.

23. Егупов Н.Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова.- М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2001.- 774с.

24. Емельянов С.В., Уткин В.И., Таран В.А. и др. Теория систем с переменной структурой / Под ред. С.В. Емельянова . – М.: Наука, 1970. – 592с.

25. Зеленцов С.В., Зеленцова Н.В. Современная фотолитография. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006. – 58 с.

26. Калачев Ю.Н. Алгоритмы ШИМ в преобразователях частоты [Текст] / Ю.Н.Калачев // Приводная техника. - 2011. - N 5(93). - С. 3-11.

27. Калачев Ю.Н. SIMINTECH: Моделирование в электроприводе/ Ю.Н. Калачев; под ред. Д.А. Мовчан. – Изд-во: ДМК Пресс, 2019. – 98 с.

28. Козаченко В.Ф., Обухов Н.А., Веселов М.В. Новый контроллер для встроенных применений в системах управления приводами переменного тока // Электротехника. - 2000. - №2. - С. 41-47.

29. Кононов В. И.На службе высоким технологиям: 45 лет Воронеж. НИИ полупроводникового машиностроения / авт.-сост. В И. Кононов. – Воронеж: Альбом, 2006. – 160 с.: 16 с. цв. илл.

30. Кононов В. И.НИИПМ: Вчера, сегодня, завтра: 50 лет НИИПМ / НИИ полупроводникового машиностроения; авт.-сост. В. И. Кононов. – Воронеж: Альбом, 2011. – 220 с. :цв. ил.

31. Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB–SIMULINK): Учебное пособие. 3-е изд. СПб: Лань, 2019. - 312 с.

32. Куликов И.Н., Рябов В.Т., Шубников А.В. Имитационное моделирование кластерного технологического оборудования в полупроводниковом производстве // Наноинженерия. – 2013. - № 9(27). - С. 3-6.

33. Лапшинов Б.А. Технология литографических процессов. Учебное пособие – Московский государственный институт электроники и математики. М., 2011.– 95 с.

34. Лизец М.К., Поташников М.Ю. 8- и 16- битные микроконтроллеры фирмы "Siemens AG" // Электротехника. - 1996. - №12. - С. 42-45.

35. Мазель Е. З., Пресс Ф. П., Планарная технология кремниевых приборов / Е. З. Мазель, Ф. П. Пресс. – М.: Энергия, 1974. – 384 с.

36. Макарчук В. В. Методы литографии в наноинженерии : учеб.пособие / В. В. Макарчук, И. А. Родионов, Ю. Б. Цветков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 176 с.

37. Малашевич Б.М. Зеленоградский Центр микроэлектроники: Создание, расцвет, закат…/ журнал “Электроника: Наука, Технология, Бизнес”, М., 2007. - № 1. – С. 104 – 112.

38. Микроконтроллер. С167CR фирмы "Сименс АГ" – Наиболее подходящая основа для любого преобразователя // Электротехника, 1996. - №12. - С.45-47.

39. Моро У. Микролитография. В 2 ч. Ч. 1 / У. Моро ; Пер. с англ. под ред. Р. Х. Тимерова; Предисл. К. А. Валиева. - М. : Мир, 1990. - 606 с. : ил.

40. Моро У.. Микролитография. В 2 ч. Ч. 2 / У. Моро ; Пер. с англ. под ред. Р. Х. Тимерова; Предисл. К. А. Валиева. - М. : Мир, 1990. - 632 с. : ил.

41. Пат. 1668132 Российская Федерация, H 01 J 37/20. Вакуумный манипулятор / Кузнецов Н.А., Логинов П.В., Шашков А.И. - заявл. 17.10.1988; опубл. 07.08.1991.

42. Пат. 2008197 Российская Федерация, B 25 J 11/00. Прецизионное устройство для позиционирования подвижного органа машины / Лаптев А.Г.; заявитель и патентообладатель: Лаптев А.Г. - заявл. 12.03.1992; опубл. 28.02.1994.

43. Пат. 2093347 Российская Федерация, B 25 J 11/00. Манипулятор / Матющенко А.В.; заявитель и патентообладатель: Российский федеральный ядерный центр Всероссийского научно - исследовательского института экспериментальной физики. - заявл. 07.02.1996; опубл. 20.10.1997.

44. Пат. 2404480 Российская Федерация, H 01 L 21/67. Способ захвата полупроводниковых пластин для загрузки и выгрузки / Исмаилов Т.А., Шангереева Б.А., Шахмаева А.Р.; заявитель и патентообладатель: государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дагестанский государственный технический университет» (RU). - заявл. 08.05.2009; опубл. 20.11.2010.

45. Пат. 2380305 Российская Федерация, B 65 H 3/00. Устройство и способ разъединения и транспортировки подложек / Хертер Рихард (DE), Кальтенбах Конрад (DE); заявитель и патентообладатель: РЕНА ЗОНДЕРМАШИНЕН ГМБХ (DE). - заявл. 05.07.2007; опубл. 27.01.2010.

46. Пат. 2472247 Российская Федерация, H 01 L 21/02. Изготовление самостоятельных твердотельных слоев термической обработкой подложек с полимером / ЛИХТЕНШТАЙГЕР Лукас (US), ПФЕФФЕР Кристиан (US); заявитель и патентообладатель: ПРЕЗИДЕНТ ЭНД ФЕЛЛОУЗ ОФ ГАРВАРД КОЛЛЕДЖ (US). – заявл. 24.10.2008; опубл. 10.01.2013.

47. Пат. 2472247 Российская Федерация, B 25 J 9/00. Манипулятор с программным управлением / Левин С.В., Шалюхин К.А.; заявитель и патентообладатель: Учреждение Российской Академии Наук Институт Машиноведения им. Благонравова РАН (RU), Левин С.В. (RU), Шалюхин К.А. (RU). – заявл. 06.04.2009; опубл. 27.01.2011.

48. Пат. RU 214216 U1 Российская Федерация, МПК B04B 5/00 (2006.01), B04B 7/00 (2006.01), СПКB04B 5/00 (2022.08), B04B 7/00 (2022.08). Устройство для передачи вакуума через вращающийся вал / Анненков А.Н., Белоусова О.В., Кириллов И.В.; заявитель и патентообладатель: автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Международный институт компьютерных технологий» (RU). - №2022106028 :заявл. 04.03.2022 : опубл. 17.10.2022 : Бюл. № 29. – 2с.

49. Сачавец О.В. (Белоусова О.В.), Слепокуров Ю.С. Моделирование дискретных регуляторов систем автоматического управления. Вычислительные машины, автоматика и робототехника: материалы науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет». - 2007. - С 74-82. – 137 с.

50. Сачавец О.В. (Белоусова О.В.), Слепокуров Ю.С. Моделирование микропроцессорных регуляторов. Автоматизация и роботизация технологических

процессов: материалы науч.-техн. конф. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет». - 2007. - С. 44-52 – 137 с.

51. Сачавец О.В. (Белоусова О.В.), Слепокуров Ю.С. Программирование микропроцессорных регуляторов в Matlab 7.5. Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы науч.-техн. конф. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет». - 2007. - С. 41-44. – 137с.

52. Сачавец О.В. (Белоусова О.В.), Слепокуров Ю.С. Синтез систем автоматического управления методом стандартных коэффициентов. Анализ и проектирование средств роботизации и автоматизации. Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т. - 2005. - С. 66-72 – 138 с.

53. Сачавец О.В. (Белоусова О.В.), Слепокуров Ю.С. Синтез систем автоматического управления по преобладающим корням. Анализ и проектирование средств роботизации и автоматизации. Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т. - 2005. - С. 101-106 – 138 с.

54. Свид. 2022612365 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа управления автоматизированной установкой нанесения фоторезиста УНФ-200А, мониторинга параметров технологического процесса, анализа и сохранения задаваемых и измеряемых данных в базу / О.В. Белоусова, А.А. Колесников, А.Н. Анненков, заявитель и правообладатель автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Международный институт компьютерных технологий» (RU). - №2022613175; заявл. 18.02.2022г.; опубл. 01.03.2022г., Реестре программ для ЭВМ. – 1 с.

55. Сейсян Р.П. Нанолитография в микроэлектронике (Обзор) // Журнал технической физики. – СПб.: 2011. – Т.81. – №8. - С. 1-14.

56. Сидоров А. Нанесение фоторезиста при формировании межсоединений на кремнии // Наноиндустрия. - Электронный каталог СКУНБ им. Лермонтова: 2011. - № 5. - С. 28-30.

57. Сидоров А. Особенности нанесения фоторезиста при производстве МЭМС-устройств // Степень интеграции. – 2009. - №2. - С. 10–12.

58. Терехов В.М. Современные способы управления и их применение в электроприводе / В.М. Терехов // Электротехника. – 2000. - №2. - С. 14-19.

59. Филиппов А.В., Косолапов М.А., Маслов И.А., Тарасова Г.И. Автоматизированная настройка ПИД-регулятора для объекта управления следящей системы с использованием программного пакета MATLAB Simulink // Наука, техника и образование. 2015. No. 12. с. 53-59.

60. Фотолитография и оптика [Текст] / Под ред. проф. Я. А. Федотова и проф. Г. Поля. - Москва :Сов.радио ; Берлин : Техника, 1974. - 291 с. : ил.; 22 см.

61. Чье ЕнУн, Шеин А.Б. Интерполирование функций для задач моделирования электронных устройств. Ч. I // Информатика и системы управления. 2014. № 2(40). С. 33-38.

62. Чье ЕнУн, Шеин А.Б. Интерполирование функций для задач моделирования электронных устройств. Ч. II // Информатика и системы управления. 2014. № 3(41). С. 39-46.

63. Экснер Х., Фрейтаг Р., Гайс Х., Ланг Р. и др. Гидропривод основы и компоненты. Учебный курс по гидравлике, том 1 (BoschRexroth) - Издание 2 – 2003. - 323 с.

64. Юрий Петропавловский. Микросхемы привода бесконтактных двигателей постоянного тока NJR, SITI, ONS. Журнал Компоненты и технологии, изд. Файнстрит. - 2010. - №3. – С.76-82.

65. CooperK.,CookK., WhitneyB. etal. Lithographic challenges and solutions for 3D interconnect // Proc. IWLPC. - 2008. - P.74-82.

66. Ishikawa T., Roberts R., Armer H. Cluster tool architecture for processing a substrate // Pat. US 20060134330 A1; Assignee: Applied Materials, Inc. - заявл. 22.04.2005; опубл.22.06.2006.

67. Landesberger C., Scherbaum S., Bock K.. Carrier techniques for thin wafer processing // Proc.of CS Mantech Conference, Austin, Texas, USA, May 14-17, 2007. - P. 33-36.

68. Mathias Dümmler. Modeling and optimization of cluster tools in semiconductor manufacturing // Dissertation zurErlangung des naturwissenschaftlichenDoktorgrades. Würzburg, 2004. - 158 p.

69. Noack D., Mosinski M., Rose O., Lendermann P., and Gan B. P. Challenges and solution approaches for the online simulation of semiconductor wafer fabs // Winter Simulation Conference: The premier international conference for simulation professionals in discrete and combined discrete-continuous simulation, AZ, USA, 11–14 December 2011: proceedings. – Phoenix : WSC, 2011. – P. 1845–1856.

70. Photolithography. Theory and Application of Photoresists, Etchants and Solvents.K. КохиТ. Ринке. (2012).

71. Hauser J.R. Cluster tools - hardware and process intergration // Proceedings of the Second International Symposium on Ionic and Mixed Conducting Ceramics. – Pennington, NJ: Electrochemical Society, 1994. - P. 265-276.

72. Sugeno M., Yasukawa T.A. A fuzzy-logic – based approach to qualitive modeling // IEEE Trans. Fuzzy Systems, 1993. –Vol. 1, No.1. – P. 7-31.

73. Yin W., Ye Z., Ma W., Chen Y., Hu X. Spray coater technology in HgCdTe third-generation infrared focal plane arrays // Proc. SPIE 8193, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011. September, 2011.

74. Zhenyu Yu. Space-Vector PWM With TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns / Digital Signal Processing Solutions/ Application Report, SPRA524, March 1999. – 44p.

75. 3D Packaging Overview. Amkor Group. Sept. 2009.

76. АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий» [сайт]. - URL: http://iict.ru/наука (Дата обращения: 25.10.2022).

77. АО «Единая электронная торговая площадка «Росэлторг»»: НИР «Разработка установки безмасочной рентгеновской нанолитографии на основе МЭМС динамической маски для формирования наноструктур с размерами от 13 нм и ниже на базе синхротронного и/или плазменного источника», шифр «Рентген-

Литограф»: [сайт]. - URL: https://www.roseltorg.ru/procedure/0173100009521000167 (Дата обращения: 25.10.2022).

78. АО «НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» [сайт]. - URL: http://goi.ru (Дата обращения: 25.10.2022).

79. АО Научно-исследовательский институт точного машиностроения: [сайт]. - URL: http://niitm.ru (Дата обращения: 25.10.2022).

80. АО «НИИЭТ». Каталог. Микропроцессоры: [сайт]. - URL: https://niiet.ru/product-category/chips/microcont/ (Дата обращения: 25.10.2022).

81. АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица [сайт]. - URL: https://tagat.ru (Дата обращения: 25.10.2022).

82. Виртуальный компьютерный музей / История отечественной вычислительной техники [сайт]. - URL: https://computer-museum.ru/histussr/nc_zel_2.htm (Дата обращения: 25.10.2022).

83. Гуляев И. В. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя : монография / И. В. Гуляев, Г. М. Тутаев. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – 200 с. [Электронный ресурс]. - URL: https://ies.mrsu.ru/text/metod/ (Дата обращения: 25.10.2022).

84. Завод ПРОТОН: [сайт]. - URL: https://aoproton.ru (Дата обращения: 25.10.2022).

85. Институт физики микроструктур Российской академии наук: [сайт]. - URL: http://ipmras.ru/ru/index (Дата обращения: 25.10.2022).

86. Компания АВЕОН. Каталог. Advantech PCI-1756-BE — плата дискретного ввода-вывода: [сайт]. - URL: https://aveon.ru/catalog/pci-1756-be/ (Дата обращения: 25.10.2022).

87. Компания ОВЕН. Оборудование для автоматизации. Каталог. Регуляторы [сайт]. - URL: https://owen.ru/product/trm101 (Дата обращения: 25.10.2022).

88. Компания ОВЕН. Оборудование для автоматизации. Каталог. Usb-преобразователь [сайт]. - URL: https://owen.ru/product/owen_as4 (Дата обращения: 25.10.2022) .

89. Компания Сименс. Каталог. Микроконтроллер [сайт]. - URL: https://www.siemens-pro.ru/s7-1200/6AG1214-1BD23-2XB0.html (Дата обращения: 25.10.2022).

90. Конструкторское бюро технологических машин (КБТМ) [сайт]. - URL: http://vkbtm.ru. (Дата обращения: 25.10.2022).

91. Конструкторское бюро технологических машин (КБТМ). Видеоматериал работы автоматизированной установки нанесения фоторезиста [сайт]. - URL: АУНФ.mp4 (25048384). (Дата обращения: 20.10.2022).

92. Корпорация Intel. Каталог. Процессоры: [сайт]. - URL: https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/products/details/processors.htm (Дата обращения: 25.10.2022).

93. Лоссов К.И., Маркарян Е.Г. Преобразования Фурье и Лапласа: методические указания. — М.: МИИГАиК, 2017. — 68 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.miigaik.ru/upload/iblock/b78/b78ca9f412a932682781924663c5bbe9.pdf?ysclid=l9jw2ulzoc386094227 (Дата обращения: 22.10.2022).

94.Мельник А.А., Медунова Е.А. Построение моделей с применением пакета System Identification Toolbox матричной лаборатории matlab+simulink // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование №3 (47) 2015 [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-modeley-s-primeneniem-paketa-system-identification-toolbox-matrichnoy-laboratorii-matlab-simulink/viewer (Дата обращения: 22.10.2022).

95. Метод нанесения фоторезистивного слоя на подложку. Патент 2370853C1 Российская Федерация, H01L21/312/ Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Шангереева Б.А.; заявитель и патентообладатель: государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дагестанский государственный технический университет» (ДГТУ) (RU). – заявл. 17.07.2008; опубл. 20.10.2009 [сайт]. - URL: https://patenton.ru/patent/RU2370853C1 (Дата обращения: 20.10.2022).

96. Нанесение, проявление и сушка фоторезиста. Статьи. ООО «Минатех» - Микро и нано технологии [Электронный ресурс]. - URL: https://minateh.ru/stati/nanesenie-proyavlenie-i-sushka-fotorezista (Дата обращения: 20.10.2022).

97. Национальный исследовательский университет МИЭТ [сайт]. - URL: https://www.miet.ru (Дата обращения: 25.10.2022).

98. ОАО «Лианозовский электромеханический завод» [сайт]. - URL: https://lemz.ru(Дата обращения: 25.10.2022).

99. ОАО НИИПМ г. Воронеж [сайт]. - URL: http://vniipm.ru/ru/produkciya(Дата обращения: 25.10.2022).

100. ООО «Микрофотоника»: [сайт]. - URL: http://mikrofotonika.ru(Дата обращения: 25.10.2022).

101. ООО «Нанопромимпорт»: [сайт]. - URL: https://new.npimport.ru (Дата обращения: 25.10.2022).

102. ООО «Сертал»: [сайт]. - URL: https://www.sertal.ru (Дата обращения: 25.10.2022).

103. ООО «Электропривод». Каталог. Блоки управления двигателями BMD. [сайт]. - URL: https://electroprivod.ru/bmd (Дата обращения: 25.10.2022).

104. Перспективная серия микроконтроллеров фирмы Texas Instruments 240 x для систем цифрового управления двигателями [сайт]. - URL: http: // www.chipnews.ru. (Дата обращения: 25.10.2022).

105. Плотников Ю.В., Уймин Ю.С. Особенности реализации векторной ШИМ для микропроцессоров TMS320. Конференция молодых ученых. УралЭНИН, ФГАОУ ВО «УрФУ», 2018. – С. 232 - 236 [Электронный ресурс]. - URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/66528/1/978-5-8295-0616-2-2018-63.pdf (Дата обращения: 25.10.2022).

106. Полуавтоматическая установка нанесения фоторезиста НФ-150П. Оборудование фотолитографии. НИИПМ [сайт]. - URL: http://vniipm.ru/ru/produkciya/product/view/3/4 (Дата обращения: 20.10.2022).

107. Преобразователи АЦПВТ-15П-Д1, АЦПВТ-16П-Д1, АЦПВТ-18П-Д1, АЦПВТ-22П-Д1, АЦПВТ-12П-01, АЦПВТ-14П-01. Руководство по эксплуатации ЮИНЦ.434757.074 – 01 РЭ ЗАО "РИВАРС" [Электронный ресурс]. - URL: http://rivas-spb.ru/produkciya (Дата обращения: 25.10.2022).

108. Программное обеспечение для инженерного анализа и численного моделирования ANSYS. [сайт]. - URL: [https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/.(Дата обращения: 25.10.2022).

109. Программное обеспечение STEP7 [сайт]. - URL: https://www.elinc.ru/Downloads/Siemens/step7_in_manual_ru.pdf (Дата обращения: 25.10.2022) .

110. C++ (язык программирования) [Электронный ресурс]. - URL: https://ru.bmstu.wiki/C%2B%2B (Дата обращения: 25.10.2022).

111. Установка нанесения фоторезиста автоматическая УНФ-150А. Конструкторское бюро технологических машин (КБТМ) [сайт]. - URL: http://vkbtm.ru/catalog/cpf150a (Дата обращения: 25.10.2022).

112. Установка фотолитографии НИИПМ г. Воронеж [Электронный ресурс]. - URL: https://sdelanounas.ru/blogs/123817/(Дата обращения: 25.10.2022).

113. Устройства для нанесения фоторезиста вращением. Патент 2012093C1 Российская Федерация, H01L 21/3205 / Иванов А.С., Валентинов М.М., Недоспасов В.Г., Панов В.Д.; заявитель и патентообладатель: Воронежский опытный завод микроэлектроники "Риф". – заявл. 26.03.1992; опубл. 30.04.1994 [сайт]. - URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2012093C1_19940430(Дата обращения: 20.10.2022).

114. Устройство для нанесения фоторезиста методом центрифугирования. Патент 2509390 Российская Федерация, H01L 21/312 / Аксенова О.В., Карпова М.В., Корзенев Г.Н., Короткова Г.П., Нетесин Н.Н., Поволоцкий С.Н., Русских Г.В., Цыганов А.Б.; заявитель и патентообладатель: Российская Федерация, от им. которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом" , "Российский федеральный ядерный центр - ВНИИ экспериментальной физики" -

ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ". – заявл. 18.07.2012; опубл. 10.03.2014 [сайт]. - URL: https://findpatent.ru/patent/250/2509390.html (Дата обращения: 20.10.2022).

115. ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В.Гребенщикова РАН (ИХС РАН) [сайт]. - URL: https://www.iscras.ru (Дата обращения: 25.10.2022).

116. Фоторезист: Описание и документация. Научно-производственная компания ФРАСТ-М [Электронный ресурс] – URL: https://frast.ru/dalniyuf.pdf.(Дата обращения: 25.10.2022).

117. Центрифуга для нанесения фоторезиста YOTEC ASC-100. Оборудование для производства микроэлектроники. Спутник микротехнологий [Электронный ресурс] – URL: https://sputnik-micro.ru/oborudovanie/nanesenie-pokrytij-centrifugirovaniem/centrifuga-yotec-asc-100/(Дата обращения: 20.10.2022).

118. Центрифуга EZ4 spincoater для нанесения тонких пленок и фоторезиста. Оборудование для лабораторий. Спецтехника [Электронный ресурс] – URL: https://npk-stn.ru/product/ez4_spin_coater/?yclid=7550955271891509600(Дата обращения: 20.10.2022).

119. Цифровые сигнальные процессоры. Микроконтроллеры. Информационный материал Научно-исследовательского института электронной техники НИИЭТ. Каталог продукции 2018 г. Воронеж, 2018г. [Электронный ресурс]. - URL: https://eandc.ru/techinfo/catalog-niiet.pdf (Дата обращения: 22.10.2022).

120. Чебоксарский электроаппаратный завод: Продукция/ Электропривод и энергосберегающее оборудование/ Электродвигатели и регулируемые электроприводы / Двигатели синхронные (вентильные) 5ДВМ: [сайт]. - URL:https://www.cheaz.ru/products/ese/motors/5dvm-es.html(Дата обращения: 22.10.2022).

121. Американская компания Analog Devices. Каталог. Процессоры: [сайт]. - URL: https://www.analog.com (Дата обращения: 25.10.2022).

122. Большая Советская Энциклопедия, статья «Фоторезист» [Электронный ресурс]. - URL: http://bse.sci-lib.com/article117256.html(Дата обращения: 25.10.2022).

123. Карло Фавини, EIga Europe. Выбор фоторезиста для различных технологий производства печатных плат / Статьи о печатных платах / Статьи компании Контракт Электроника / Производство электроники. [Электронный ресурс] - URL: https://www.contractelectronica.ru/articles/12-pechatnye-platy/vybor-fotorezista-dlya-razlichnykh-tekhnologij-proizvodstva-pechatnykh-plat (Дата обращения: 25.10.2022).

124. Компания Festo. Каталог. Шаговые двигатели. [сайт]. - URL: https://www.festo.com/cat/ru_ru/products__95370(Дата обращения: 20.10.2022).

125. Компания Prom Electrica. Каталог. Энкодеры [сайт]. URL: https://promelectrica.ru/catalog/raznoe/work_new/e20s2/e20s2_100_3_n_5_r_a250002005/ (Дата обращения: 22.10.2022)

126. Компания Solar-Semi [сайт]. - URL: http://www.solar-semi.com/(Дата обращения: 22.10.2022).

127. Компания Stäubli[сайт]. - URL: https://www.staubli.com/ru-ru/fluid-connectors-quick-mold-change/ (Дата обращения: 25.10.2022).

128. Немецкая компания Infineon Technologies. Каталог. Процессоры: [сайт]. - URL: infineon.com (Дата обращения: 25.10.2022).

129. ООО Реал Коро . Heidenhain. Угловые датчики положения [сайт]. - URL: http: // www.real–inter.com (Дата обращения: 25.10.2022).

130. Цыбулько А., Беспалова Н., «Квантовый конструктор» Жореса Алфёрова / журнал «Наука и техника», 2019. - №4 (155) [Электронный ресурс]. - URL: https://naukatehnika.com/kvantovyij-konstruktor-alfyorova.html (Дата обращения: 25.10.2022).

131. Электронный каталог Solar-Semi: Maximus 802 MicroClusterSystem [Электронный ресурс]. - URL: http://www.solar-semi.com/31101/Download/index.aspx. (Дата обращения: 25.10.2022).

132. Электронный каталог Solar-Semi: Microcluster – Automatic System Platform [Электронный ресурс]. - URL: http://www.solar-semi.com/31101/Download/index.aspx(Дата обращения: 25.10.2022).

133. Электронный каталог SUSS Micro Tec Group: Automatedcoater/developerplatformACS200 Gen3 [Электронный ресурс]. - URL: http://www.suss.com/fileadmin/user_upload/datasheets/Datasheet_ACS200_Gen3.pdf(Дата обращения: 20.10.2022).

134. Электронный каталог TEL: product [Электронный ресурс]. - URL: http://www.tel.com/ (Дата обращения: 20.10.2022).

135. A comprehensive study of spin coating as a thin film deposition technique and spin coating equipment/Tyona, M.D. (Department of Physics, Benue State University), 2013. -Vol. 2. - No. 4. - P.181-193 [Электронныйресурс]. –URL: http://dx.doi.org/10.12989/amr.2013.2.4.181 (Дата обращения: 20.10.2022).

136. Applications of Laser Cleaning Process in High Value Manufacturing Industries. Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques / Volume 11/Book / SundarMarimuthu, HüseinKürşadSezer and Alhaji M. Kamara, 2019. – P. 251-288 [Электронный ресурс]. - URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128155776000074 (Дата обращения: 20.10.2022).

137. Aqueous Cleaning and Surface Conditioning Processes. PART II: WET CHEMICAL PROCESS. Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology Book / Glenn W. Gale, Robert J. Small and Karen A. Reinhardt (Second Edition), 2008. – P. 201-265 [Электронный ресурс]. - URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515548500070 (Дата обращения: 25.10.2022).

138. Cryogenic Aerosols and Supercritical Fluid Cleaning. PART III: DRY CLEANING PROCESSES. Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology Book / Souvik Banerjee, Richard F. Reidy and Laura B. Rothman Mauer (Second Edition), 2008. – P. 429-478 [Электронный ресурс]. - URL:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515548500100 (Дата обращения: 25.10.2022).

139. Dr. Bob Davidov. System Identification Toolkit.[Электронный ресурс]. URL: https://portalnp.snauka.ru/wp-content/uploads/2013/11/03.01_System-Identification-Toolbox_Ed_2a.pdf?ysclid=l9jv0vs05b644493217 (Дата обращения: 22.10.2022)

140. Fundamentals and Applications of Plasma Cleaning. Dinesh P.R. Thanu, ... Manish Keswani, in Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques, 2019 [Электронный ресурс]. - URL: https://www.sciencedirect.com/book/9780128155776/developments-in-surface (Дата обращения: 22.10.2022).

141. Héctor Huerta, René Osorio, Nimrod Vázquez. Control no Lineal Robusto de unaMáquinaparaFabricación de PelículasDelgadas. UniversitatPolitècnica de ValènciaInicio, 2017. - Vol. 14. - №3 [Электронный ресурс]. – URL: https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/9205 (Дата обращения: 25.10.2022).

142. Microfabrication technologies used for creating smart devices for industrial applications, José M. Quero, ... Carmen Aracil, in Smart Sensors and MEMs (Second Edition), 2018 [Электронный ресурс]. –URL: Photoresist - an overview | ScienceDirect Topics (Дата обращения: 25.10.2022).

143. Microfabrication technologies used for creating smart devices for industrial applications. Smart Sensors and MEMs .Book / José M. Quero, Francisco Perdigones and Carmen Aracil, (Second Edition), 2018. – P. 291-311 [Электронный ресурс]. - URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020555000115 (Дата обращения: 20.10.2022).

144. Nanostructured flexible PVDF and fluoropolymer-based hybrid films. Frontiers of Nanoscience /Volume 14 / FaynaMammeri, 2019. – P. 67-101 [Электронный ресурс]. –URL:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081025727000039 (Дата обращения: 20.10.2022).

145. Overview of Wafer Contamination and Defectivity. PART I: INTRODUCTION AND OVERVIEW.Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology Book / TwanBearda, Paul W. Mertens and Stephen P. Beaudoin (Second Edition), 2008. – P. 93-164 [Электронный ресурс]. –URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515548500057 (Дата обращения: 20.10.2022).

146. Particle Deposition and Adhesion. PART II: WET CHEMICAL PROCESS.Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology Book / Ahmed Busnaina, KavehBakhtari and Jin-goo Park (Second Edition), 2008. – P. 167-200 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515548500069 (Дата обращения: 20.10.2022).

147. PLC Programming with SIMATIC STEP7. Siemens [Электронныйресурс].-URL: https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal/software/step7-tia-portal.html (Дата обращения:22.10.2022).

148. Siemens. Каталог. Преобразователи RS-232 - RS-485. [сайт]. - URL: https://search.dc.siemens.com/en?q=converter (Дата обращения:22.10.2022).

149. Solid–Liquid Filtration. Filters and Filtration Handbook/Book / Sixth Edition / TrevorSparksGeorgeChase, 2016. – P. 199-295 [Электронный ресурс]. –URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080993966000046 (Дата обращения: 20.10.2022).

150. Spin-Coater Machine Control Via Passivity With Sliding Modes / IEEE Access PP(99):1-1 / Hector Huerta, N. Vazquez, 2020 [Электронный ресурс]. –URL: https://www.researchgate.net/publication/338494826_Spin-Coater_Machine_Control_Via_Passivity_With_Sliding_Modes (Дата обращения: 22.10.2022).

151. Thermal processes. Solution Processed Metal Oxide Thin Films for Electronic Applications Metal Oxides / Lei Liaoa, ZhengCuib, 2020. – P. 99-107 [Электронный ресурс]. –URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128149300000074 (Дата обращения: 22.10.2022).

Приложение А

Участие с опытным образцом автоматизированной установки нанесения фоторезиста в VIII - ом межрегиональном форуме «Воронежская область – ваш партнер».

Приложение Б

Копия АКТА об использовании результатов диссертационной работы в НИОКР АНОО ВО «МИКТ»

«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор АНОО ВО
«Международный институт
компьютерных технологий»
_____ А.И. Шиянов
«5» октября 2020 г.

АКТ
внедрения результатов диссертационной работы
Белоусовой Олеси Владимировны
«Автоматизированная установка нанесения фоторезиста»
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Конструкторское бюро технологических машин инженерно – технического центра АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий» в 2011 – 2020 гг. выполнило ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по созданию широкой гаммы конструктивных модификаций автоматизированных установок нанесения фоторезиста для ОАО «Лианозовский электромеханический завод», г.Москва; Ордена Трудового Красного Знамени «Институт химии силикатов» имени И.В. Гребенщикова», г. Санкт-Петербург; АО «Государственный оптический институт» им. Вавилова», г. Санкт-Петербург и ряда других организаций.

В процессе указанных НИОКР использованы следующие результаты теоретических исследований, проведенных соискателем Белоусовой О.В., корректность которых нашла практическое подтверждение в ходе экспериментальной отработки:

1. Пакет программного обеспечения для блока управления автоматизированной установки фоторезиста.
2. Математическая модель динамического расчета бесконтактного исполнительного двигателя электропривода центрифуги.
3. Модель динамического расчета электропривода, при помощи которой выполнен расчёт режимов работы центрифуги.
4. Конструкции узла подачи вакуума на ротор центрифуги, транспортного модуля и модуля термообработки, обеспечивающие повышенные технико – эксплуатационные показатели установки.

Начальник КБ технологических машин _____ Кириллов И.В.

Учёный секретарь НТС, д.т.н. _____ Каладзе В.А.

Приложение В

Копия АКТА внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс АНОО ВО «МИКТ»

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по учебной и воспитательной работе АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий»
_____Рыжков А.В.
«06» сентября 2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты *пакет программного обеспечения для блока управления автоматизированной установки фоторезиста, математическая модель динамического расчета бесконтактного исполнительного двигателя электропривода центрифуги, рассматриваемого как синхронная машина, замкнутая по угловому положению, модель динамического расчета электропривода центрифуги, при помощи которой выполнен расчёт её динамических режимов работы*
(содержание результатов)

диссертационной работы *«Автоматизация технологического процесса нанесения фоторезиста»,*
(наименование работы)

выполненной *на кафедре электроэнергетики энергетического факультета*
(кафедра, лаборатория)

старшим преподавателем Белоусовой Олесей Владимировной,
внедрены в учебный процесс на основании решения кафедры электроэнергетики и кафедры информатики и вычислительной техники
(решение или рекомендации министерства, вуза, факультета, кафедры)

Указанные результаты включены *в лабораторный практикум по дисциплинам «Микропроцессорные системы» и «Разработка и эксплуатация программно-аппаратных комплексов» для студентов по направлению «Информатика и вычислительная техника», а также «Электрические машины» и «Основы автоматического управления» для студентов по направлению «Электроэнергетика и электротехника» в виде методических рекомендаций и указаний по выполнению лабораторных работ, наглядные пособия в виде структурных схем, объектные модули и тексты разработанных средств программного обеспечения.*
(наименование курса, лекций, методических рекомендаций и указаний по выполнению лабораторных, курсовых и дипломных работ, наглядных пособий, лабораторного оборудования кафедры и учебных мастерских)

Заведующий кафедрой
«Информатика и вычислительная техника» _____ Слепокуров Ю.С.
(подпись, Ф.И.О.)

Заведующий кафедрой
«Электроэнергетика» _____ Беляков П.Ю.
(подпись, Ф.И.О.)