

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж - 2023

Работа выполнена в автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Международный институт компьютерных технологий» на кафедре электроэнергетики.

Научный руководитель: **Анненков Андрей Николаевич**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Кудинов Юрий Иванович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», кафедра информатики, заведующий кафедрой
Кудряшов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «07» апреля 2023 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 99.2.031.03, созданного на базе ВГТУ, ВГУ и ЛГТУ, по адресу: г. Воронеж, Московский проспект, 14, аудитория 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте www.cchgeu.ru.

Автореферат разослан «09» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.2.031.03
доктор технических наук, профессор

С.Ю. Белецкая

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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 150 и 300 нм. Отечественные предприятия, занимающие лидирующие позиции на нашем рынке микроэлектроники, на данный момент используют уровень технологии (90÷70) 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 70 нм и ниже является обеспечение её равномерности и точности стабилизации температурных параметров рабочих поверхностей технологических модулей и самого фоторезиста при включенном фильтровентиляционном блоке.

Поэтому в настоящее время для удовлетворения спроса потребителей является актуальной задача по созданию установки, обеспечивающей технологические нормы 90 нм и ниже; а также комплекса алгоритмов работы модулей оборудования и установки в целом, включая разработку 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. Мишустиним 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 по технологическим нормам 5 нм, а опытные образцы можно делать по нормам 3 нм. Подобное оборудование как до, так и после введения санкций, в Россию никогда не поставлялось. В целом нанесение фоторезистов методом центрифугирования достаточно хорошо описано в

трудах Я.А. Федотова, А.В. Субашиева, В.И. Переля, В.Д. Вернера, Б.А. Лапшинова, К.А. Валиева, К. Кохи, Т. Ринке и др. Тем не менее особенности, обусловленные необходимостью формирования плёнок толщиной порядка 90 нм и ниже, определяют требования к закону изменения скорости в процессе разгона центрифуги и становятся центральным вопросом технологии их нанесения. Научные публикации на эту тему практически отсутствуют. В настоящее время на российском рынке нет отечественного оборудования для фотолитографии, отвечающего мировому уровню. Главные недостатки отечественного оборудования состоят в качественно низких характеристиках ряда важных технологических модулей, в том числе нанесения фоторезиста, ограничивающих их применение для технологий уровня 90 нм и ниже.

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 также 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 требуемой равномерности 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 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 включен набор макросов, обеспечивающих автоматическую обработку подложек с заданными характеристиками, а также процедуру 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, отличающийся конструктивным расположением, формой и материалом вакуумного уплотнения.

Методы исследования. При решении поставленных задач в диссертационной работе использовались методы теории автоматического управления, математического моделирования, цифрового управления, программного обеспечения АСУ. При решении вычислительных задач использовалось ПО С++ и STEP7, а также пакеты программ Matlab, КОМПАС. Испытания проводились на модификациях установок нанесения фоторезиста, разработанных в рамках ряда 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, обеспечивающая 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. Программное обеспечение для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста.

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

Реализация и внедрение результатов исследования. Различных модификаций автоматизированные установки нанесения фоторезиста были поставлены для ряда ведущих предприятий РФ: ОАО «ЛЭМЗ» (Лиаозовские 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 - 13] – создание методики формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, [9, 14] – разработка модели автоматической системы управления центрифуги, [2, 8, 15] – 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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и содержит 191 страницу основного машинописного текста, 88 рисунков, 21 таблицу, список литературы из 151 наименований и три приложения. Общий объем работы составляет 194 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение отражает актуальность тематики, определяет основные цели и задачи работы, формулирует научную новизну и практическую ценность научных результатов, основные положения, представляемые к защите, отражает реализацию результатов работы, уровень её апробации, определяет количество публикаций по теме диссертационной работы, а также структуру и объём диссертации.

В первой главе дан анализ тенденций развития технологического процесса и оборудования фотолитографии; приведено описание конструкций отдельных модулей и блоков, входящих в состав кластерных комплексов; рассмотрен технологический процесс нанесения фоторезиста.

Указаны основные недостатки отечественного оборудования и перечислены главные проблемы технического и технологического исполнения подобного рода установок.

Перечислены основные параметры технологического процесса нанесения фоторезиста такие, как параметры управляющего воздействия, параметры внешнего воздействия, а также контролируемые параметры.

Закон управления динамическим режимом установки нанесения сформулируем следующим образом. Введение в качестве обратной связи функции (1) изменения угла опережения включения в зависимости от величины заданного ускорения позволит обеспечить постоянство угла наклона скоростной характеристики центрифуги, т.е. равномерность толщины плёнки фоторезиста.

$$\Theta_i = \Theta_{\kappa} \left[1 - \frac{\frac{d\Omega_i}{dt}}{\frac{d\Omega_{\kappa}}{dt}} \right], \quad (1)$$

где Θ_{κ} - критический угол опережения включения;

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

$\frac{d\Omega_{\kappa}}{dt}$ - заданное ускорение.

Закон управления температурным режимом установки нанесения сформулируем следующим образом. Необходимо поддерживать в заданных узких интервалах температуры используемого фоторезиста, а также рабочих поверхностей модулей термообработки и термостабилизации при включенном фильтровентиляционном блоке, формирующем ламинарный поток воздуха и эффективно охлаждающем последние за счёт конвекции, при которых производная целевой функции по времени (2) стремится к нулю.

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial T_i}{\partial t} \rightarrow 0. \quad (2)$$

Во второй главе рассмотрены параметры, влияющие на технологический процесс нанесения фоторезиста, и приведены практические рекомендации по проектированию. Например, такие основные параметры, как ускорение, угловая скорость, дозировка подачи фоторезиста, температурные и другие параметры рабочих сред, могут быть оптимизированы так, что обеспечивается возможность получения слоя фоторезиста требуемой толщины необходимого качества.

Особые требования при выполнении технологического процесса нанесения фоторезиста на пластину предъявляются к температурным режимам технологического оборудования. Эти требования приведены в работе. Также толщина и равномерность нанесения фоторезиста зависят от абсолютной величины и постоянства ускорения электропривода центрифуги.

Основные технологические характеристики автоматизированной установки нанесения фоторезиста:

- устройство и принцип действия – вакуумный столик на валу бесконтактного двигателя электропривода центрифуги;
- метод нанесения фоторезиста – центрифугирование;
- режимы нанесения фоторезиста – динамический с радиальным сканированием подающей трубки дозатора;
- отмывка края пластины на рабочей стороне от края, мм – не более 5;
- промывка края пластины снизу, мм – $2 \div 7$;
- диапазон регулирования скорости центрифуги, рад/с – $(1 \div 1000)$;
- ускорение центрифуги, рад/с² – $(4 \div 10) \cdot 10^3$;
- диапазон задания времени выполнения процессов, с – $0,1 \div 10$.

Для того, чтобы соответствовать требованиям, которые способствуют достижению необходимой равномерности нанесения фоторезистивных масок, необходимо учитывать ряд внешних факторов, которые оказывают влияние на рабочую поверхность пластины. Эти факторы характеризуются такими параметрами, как температура окружающей среды, градиент изменения температуры, влажность, скорость воздушного потока фильтро-вентиляционного блока, чистота помещения. Поэтому предъявляются требования по контролю над ними, которые необходимо соблюдать.

Предложена модель, представленная в виде структурной схемы системы управления для автоматизации технологического процесса нанесения фоторезиста, которая показана на рисунке 1. Приведена конструкция и основные технические характеристики автоматизированной установки нанесения фоторезиста.



Рисунок 1 – Структурная схема АСУ технологического процесса нанесения фоторезиста

Из рисунка 1 видно, что к контролируемым параметрам технологического процесса относятся температура наносимого фоторезиста T_{ϕ} ; температуры плит термообработки T_o и термостабилизации T_c ; температура очищенного воздуха T_b в рабочей зоне, также влияющая на процент брака изделий; величина скорости $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ (а значит, и угловое ускорение $\frac{\partial \Omega}{\partial t}$) и коэффициент нелинейности скоростной характеристики центрифуги, определяющие толщину и равномерность плёнки фоторезиста; а также интервалы времени обработки подложек, определяющие адгезионные и диэлектрические свойства сформированного слоя.

Рассмотрен и подробно описан состав установки нанесения фоторезиста УНФ-200А, в который входят ряд компактных технологических и транспортных модулей, размещённых в защитном боксе с фильтровентиляционным блоком в верхней его части, системой управления и ёмкостями для рабочих жидкостей, расположенными в нижней его части за дверцами из нержавеющей стали, и жидкокристаллическая панель, предназначенная для выбора оператором режима работы и вывода для него рабочей информации, которая размещена с правой стороны на подвижном кронштейне (рисунок 2).

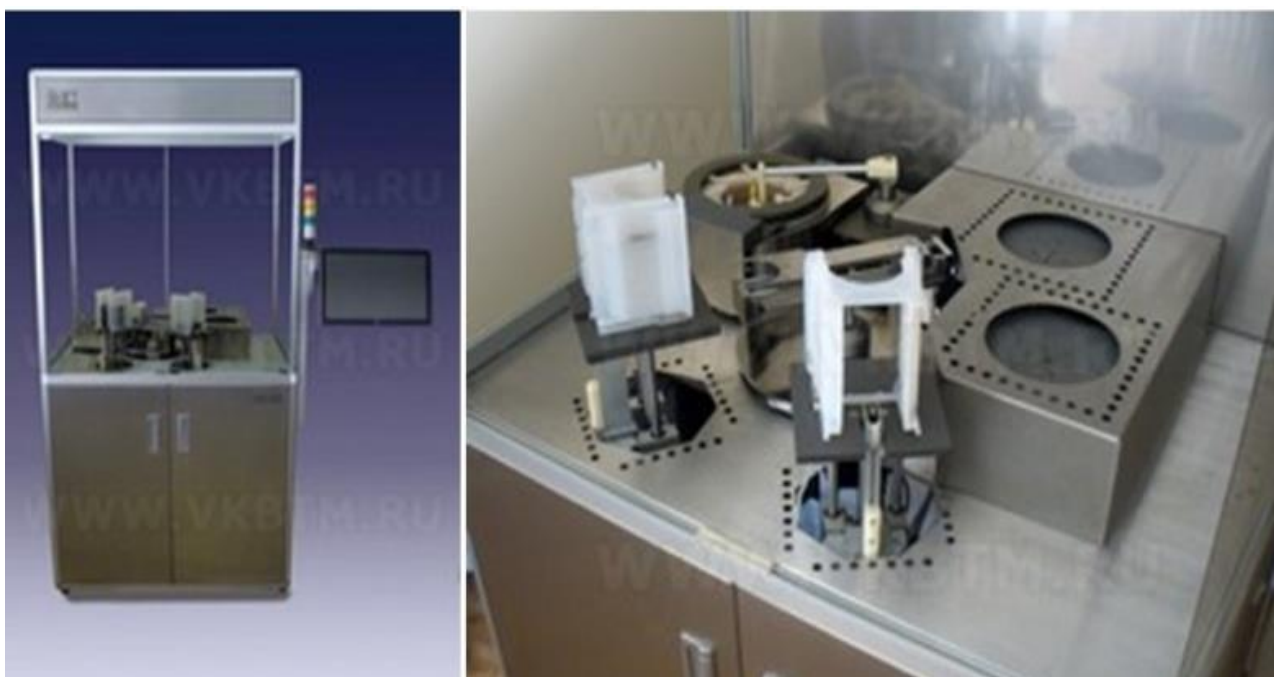


Рисунок 2 - Автоматизированная установка нанесения фоторезиста

На рисунке 2 также показано, что модули установки располагаются в контролируемой газовой среде. Это позволяет сократить количество бракованных изделий на выходе за счёт снижения уровня загрязнений в рабочей области технологического процесса. Ведь конечная продукция данной установки - это подложка с нанесённым слоем фоторезиста, который имеет толщину в нанометрах. А малейшая частица, попавшая на поверхность такой подложки, способна повредить целостность слоя, а значит, привести к браку.

В третьей главе приведена методика формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающая работу привода с постоянным ускорением и поддержание установившейся скорости вращения, представлена модель автоматической системы управления электропривода центрифуги, а также выполнен анализ динамических характеристик центрифуги.

Методика формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающая работу привода с постоянным ускорением и поддержание установившейся скорости вращения, состоит в выполнении трёх этапов вычислений.

На первом этапе после проведения серии экспериментов, функции, описывающие линейный закон увеличения скорости центрифуги, определялись методом наименьших квадратов, то есть хорошо зарекомендовавшим себя методом линейной аппроксимации. В завершении отыскивалась приближенная функциональная зависимость скорости центрифуги от времени и определялись значения параметров аппроксимирующей функции.

На втором этапе при помощи полученных данных определялись переходные характеристики центрифуги. Для синтеза управляющего сигнала, обеспечивающего желаемую скоростную характеристику центрифуги необходимо получить эквивалентную передаточную функцию системы. Для решения этой задачи использовался пакет System Identification Toolbox, на основе которого импортируемые в System Identification Toolbox сигналы и позволяли выполнить расчет дискретной передаточной функции Estimate → Transfer Function Model.

Для требуемых толщины и равномерности наносимого на кремниевую пластину фоторезиста требуется обеспечить линейный разгон центрифуги в интервале ускорений $(4 \div 10) \times 10^3 \text{ рад/с}^2$ (рисунок 3).

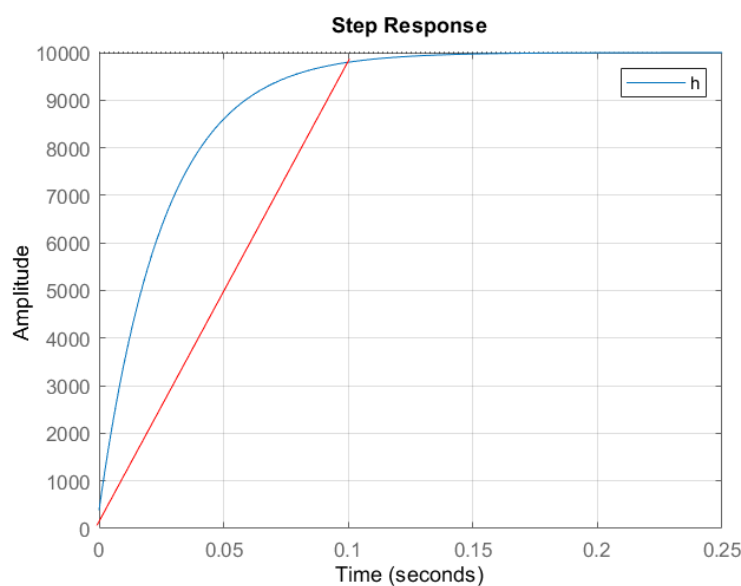


Рисунок 3 - Передаточная функция с линейным участком разгона центрифуги

На третьем этапе применялся классический метод прямого и обратного преобразования Лапласа, связывающий функцию комплексного переменного (изображение) с функцией вещественного переменного (оригинал). Используя пакет символьных вычислений Symbolic Math Toolbox был определён набор необходимых для вычисления переменных:

s – оператор Лапласа;

t – вектор времени переходного процесса;

w – изображение выходного сигнала;

sig – математическое выражение выходного сигнала.

После определения математическое выражение изображения входного сигнала и применения функции обратного преобразования Лапласа, находилось математическое выражение оригинала входной функции. Затем проводился алгоритмизированный процесс формирования управляющего сигнала (использовался 8-разрядный таймер/счетчик, имеющий 255 уровней дискретизации сигнала). По итогу всех преобразований получен выходной сигнал системы (рисунок 4).

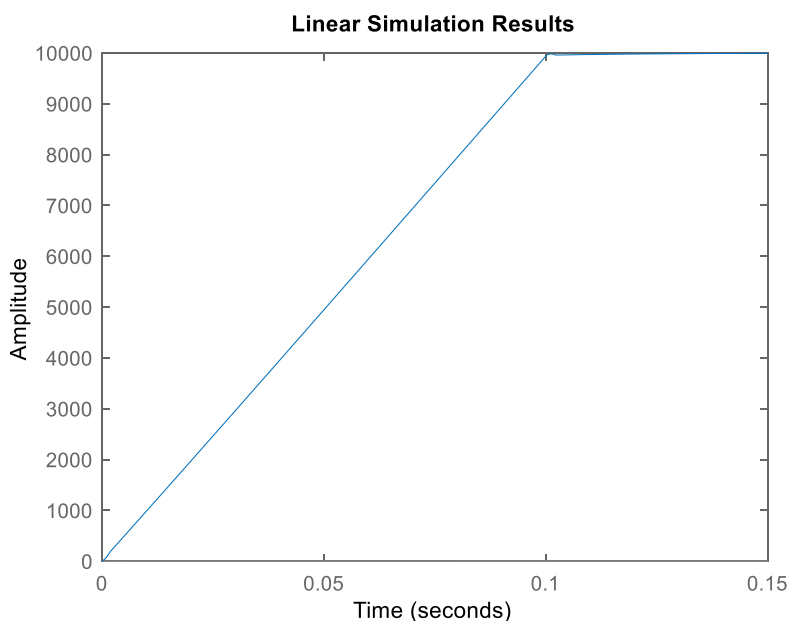


Рисунок 4 - Переходный сигнал системы

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

Предложенная методика обеспечивает эффективное воспроизведение требуемых показателей вида переходного процесса разгона центрифуги, так как малая длительность переходного процесса пуска двигателя не позволяет использовать для реализации алгоритма управления разгоном другие более сложные законы управления, требующие проведения длительных логических или математических расчетов. Для выполнения функции поддержания скорости вращения в стационарном режиме работы нетрудно разработать ряд логических

правил. При этом их реализация не будет иметь строго математического описания, являясь неким логическим регулятором.

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

Для фазных координат трехфазного БДПМ выражения для фазных напряжений будут иметь следующий вид:

$$U_A = U \cdot F_A(\varphi_{эл} + \theta_i), \quad (3)$$

$$U_B = U \cdot F_B\left(\varphi_{эл} + \frac{2\pi}{3} + \theta_i\right), \quad (4)$$

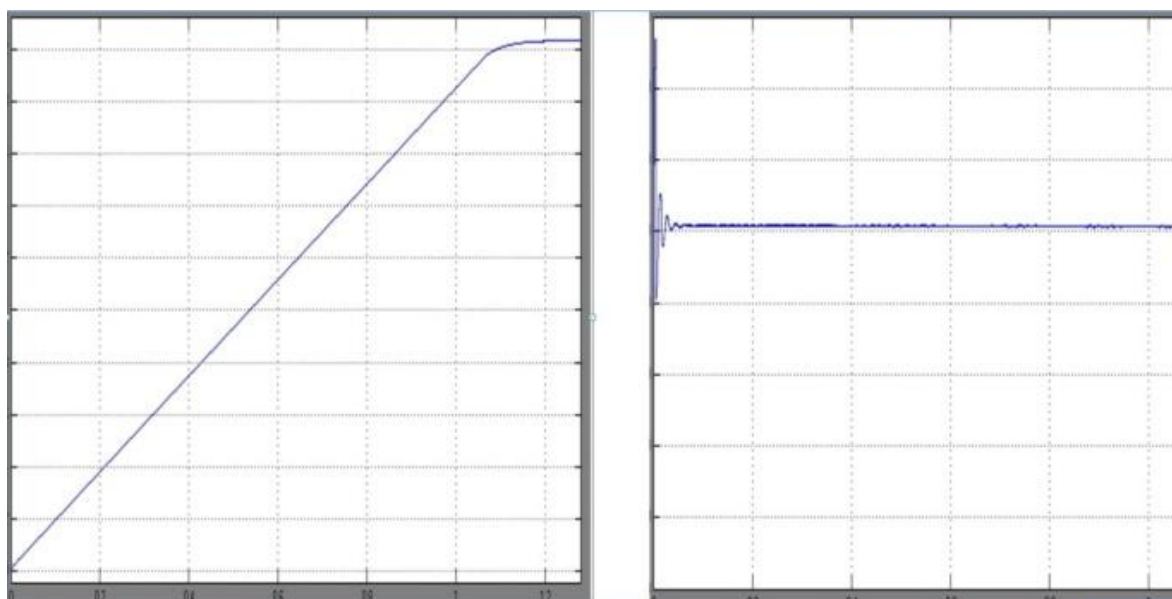
$$U_C = U \cdot F_C\left(\varphi_{эл} + \frac{4\pi}{3} + \theta_i\right), \quad (5)$$

где θ_i - угол опережения включения, определяемый по формуле (1), зависящий от нагрузки.

Управление законом изменения разгона центрифуги путём изменения угла опережения включения θ_i практически нигде ранее не применялось, поэтому проведена разработка адаптивного к изменению нагрузки программно реализованного микропроцессорного регулятора скорости за счёт изменения угла нагрузки θ_i путём опережения включения токов в статорной обмотке бесконтактного двигателя.

В модель электропривода центрифуги введена обратная связь по углу опережения включения токов в статорной обмотке бесконтактного двигателя или, другими словами, углу нагрузки θ_i , определяемой в функции отношения текущего и заданного ускорений согласно выражению (1), что обеспечивает линейный наклон характеристики скорости, то есть постоянство ускорения при возникновении возмущений.

В рамках работы выполнено исследование динамических характеристик электропривода центрифуги (рисунок 5) с обратной связью по скорости, функционально определяющей текущее значение величины угла опережения включения θ_i .



а) скорость

б) момент

Рисунок 5 - Разгон до $\Omega_{\max} = 10000$ об/мин

Полученные переходные процессы центрифуги по скорости обеспечивают высокий коэффициент линейности, то есть постоянство ускорения.

Определение функции изменения угла опережения включения в зависимости от величины заданного ускорения в соответствии с (1) позволило компенсировать возмущения, вызванные изменениями нагрузки центрифуги, обеспечив постоянство ускорения, то есть достигнуть требуемых толщин и равномерности формируемой плёнки фоторезиста.

В четвертой главе решена задача автоматизации управления процессом нанесения фоторезиста. Рассмотрен вопрос по выбору микропроцессора как базового вычислительного элемента. Ведь 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.

Для корректной и отвечающей требованиям температурного режима работы УНФ-200А подробно изложена процедура настройки параметров ПИД-регулятора модуля термообработки.

Для расчета параметров ПИД-регулятора поддержания температуры платформы используем два метода:

- метод Циглера–Никольса;
- программно-инструментальный пакет PID-Tuner системы MATLAB.

Настройку параметров производим исходя из предположения, что действие регулятора начинается при изменении температуры плиты на 3 градуса, так как в регуляторе установлена зона нечувствительности, для исключения частого включения режима коррекции.

При использовании пакета PID-Tuner автоматический расчет параметров привел к неудовлетворительному результату (наличие перерегулирования), поэтому окончательный выбор параметров регулятора был произведен методом визуальной ручной коррекции.

Оба решения проверены на модели процесса нагрева. Характеристики имеют одинаковый вид и небольшое отличие по времени коррекции (рисунок 6).

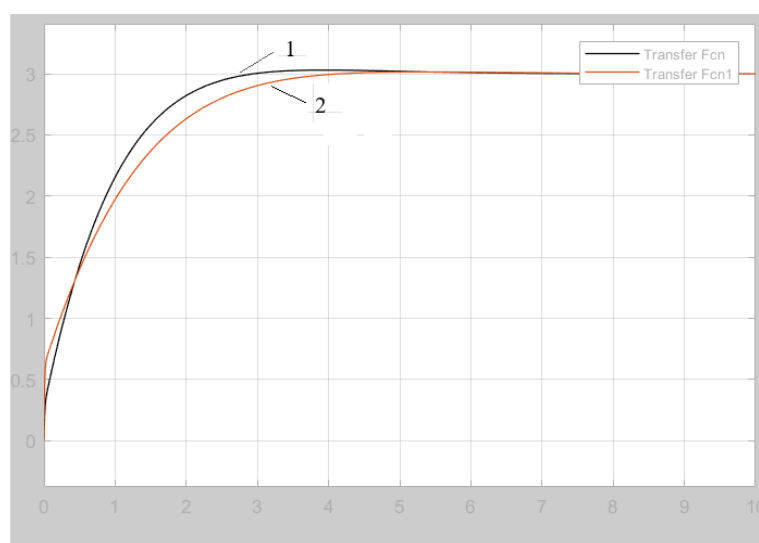


Рисунок 6 – Переходные процессы моделей установки:

- 1) при ручной настройке ПИД-регулятора в MatLabe;
- 2) при настройке ПИД-регулятора по методу Циглера-Никольса

Выбранные параметры регулятора вводятся в программу ПИД-регулятора ТРМ-101-СР в режиме ручного управления, после чего система начинает работу в автоматическом режиме с заданными характеристиками.

Для УНФ-200А были разработаны алгоритмы управления, разрядные сетки обработки команд и сигналов с датчиков, а также циклограммы работы всего комплекса технологического оборудования нанесения фоторезиста.

Циклограмма позволяет получить представление о том, как соотносится работа модулей установки между собой, а также о максимально допустимых задержках и граничных условиях функционирования модулей.

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

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

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

3-й уровень – БУ приводами и механизмами;

4-й уровень – уровень контроля параметров датчиками.

Алгоритм программного управления всеми модулями установки представлен на рисунке 7.

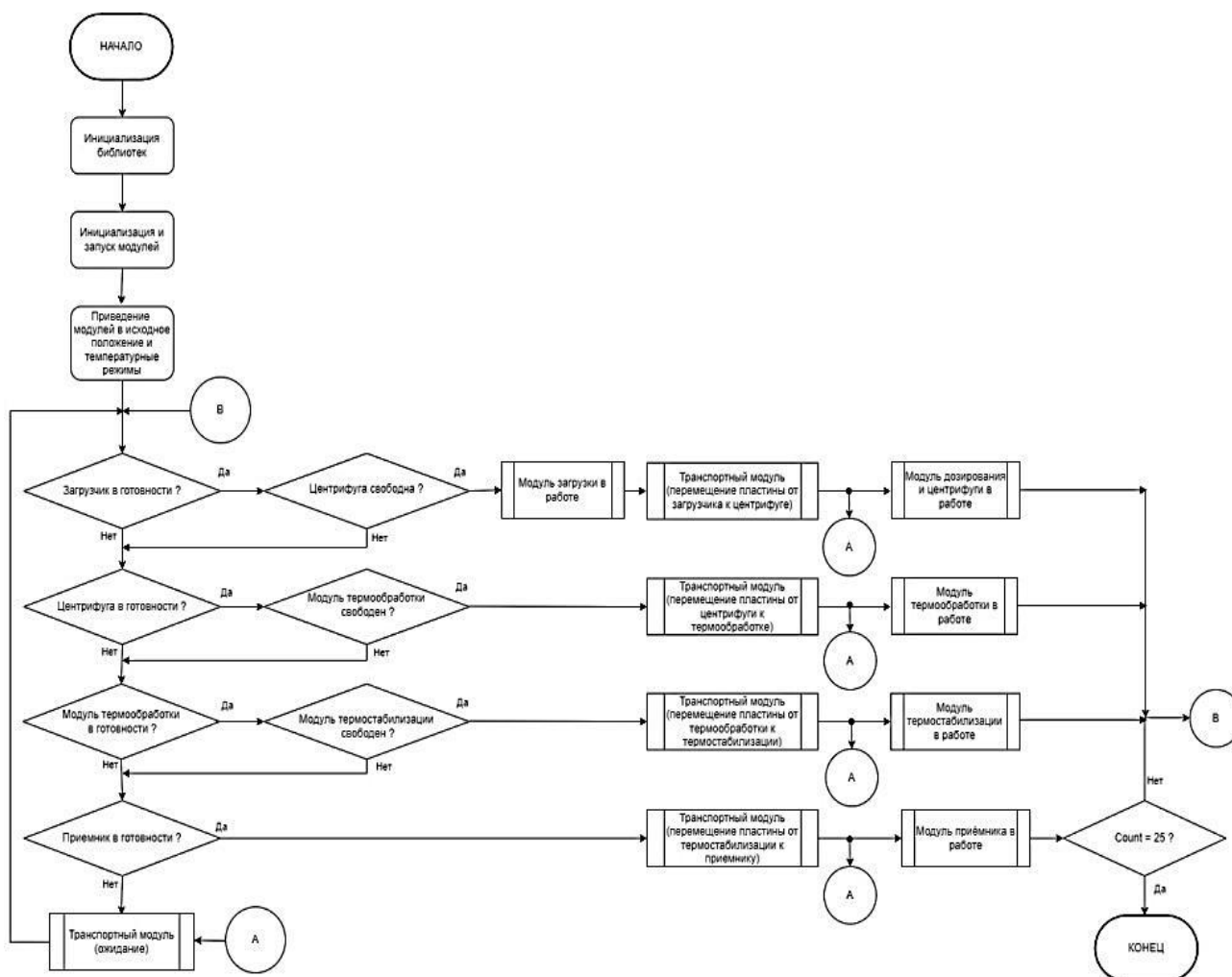


Рисунок 7 - Схема алгоритма управления модулями установки нанесения

Дано описание программного обеспечения для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста и разработан пакет программного обеспечения, на который получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Программа имеет удобный пользовательский интерфейс (рисунок 8), позволяющий реализовать автоматическую обработку пластин в процессе работы, а также в режиме диагностики работы всего комплекса технологического оборудования, благодаря чему достигается удобство эксплуатации установки.

Пользовательский интерфейс включает в себя три блока, каждый из которых характеризует определённый режим: ДИАГНОСТИКА, РАБОТА и ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.

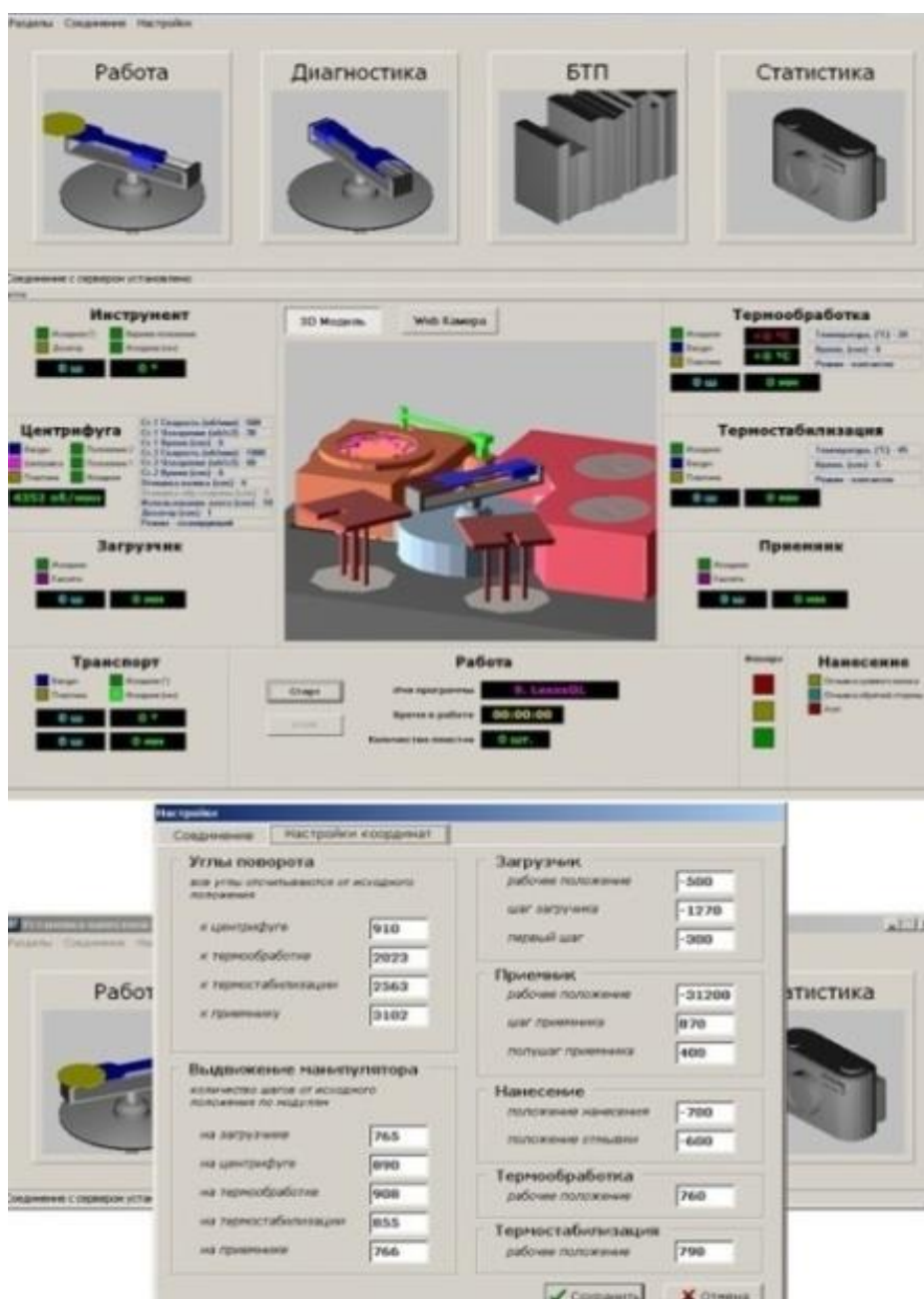


Рисунок 8 - Окна пакета ПО установки нанесения

Каждый режим имеет свои функциональные особенности. Например, режим ДИАГНОСТИКА позволяет поработать отдельно с каждым модулем установки; режим РАБОТА позволяет фиксировать параметры работы (значение температур, наличие фоторезиста, скорость воздушного потока фильтро-вентиляционного блока, давление воздуха и т.п.), а также блокировки различных видов, предлагая при этом варианты для их снятия; режим ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ позволяет

разрабатывать новые технологические программы, сохранять их и работать с ранее созданными программами.

В заключении сформулированы основные выводы по работе.

Основные результаты работы

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 системы автоматического управления процессом нанесения фоторезиста, отличающаяся наличием обратной связи по скорости вращения центрифуги, а также 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 радиоэлектроники с высокими технологическими нормами.

3. Создана новая методика формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающая линейный рост скорости центрифуги, т.е. позволяющая 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, обеспечивающая 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.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ
для публикации материалов по специальности 2.3.3*

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

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

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

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

Свидетельство о государственной регистрации программ

5. Свид. 2022612365 Российская Федерация. Свидетельство о гос. 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 / А.Н. Анненков, О.В. Белоусова, А.А. Колесников; заявитель и правообладатель: Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Международный институт компьютерных технологий» (RU), заявл. 18.02.2022; опубл. 01.03.2022.

Патент

6. Пат. RU 214216 U1 Российская Федерация, МПК В04В 5/00 (2006.01), В04В 7/00 (2006.01), СПК В04В 5/00 (2022.08), В04В 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. – 2 с.

Статьи и материалы конференций

7. Анненков, А.Н. Синтез электропривода высокого быстродействия с линейным законом динамической скоростной характеристики / А.Н. Анненков, О.В. Белоусова // Энергетика XXI: проблемы, технологии, инновации: сборник трудов международной научно-технической конференции. – Воронеж: АНОО ВО «Междунар. ин-т компьют. технологий». – 2022. – С. 16 – 19.

8. Белоусова, О.В. Разработка шагового электропривода общепромышленного назначения с электронной коммутацией / О.В. Белоусова, П.Ю. Беляков // Электроэнергетика и электротехника: сборник трудов международной научно-технической конференции. – Воронеж: АНОО ВО «Междунар. ин-т компьют. технологий». – 2019. – С. 132 - 135.

9. Белоусова, О.В. Особенности программирования микропроцессорных регуляторов в MATLAB / О.В. Белоусова // Электроэнергетика и электротехника: сборник трудов международной научно-технической конференции. – Воронеж: НОУ ВПО «Междунар. ин-т компьют. технологий». – 2018. – С. 36-39.

10. Белоусова, О.В. Анализ эффективности применения обратных связей в замкнутых по положению следящих электроприводах / О.В. Белоусова, Хусейн Аль Шинава, Абдулмохсин Майтам // Электроэнергетика и электротехника: сборник трудов международной научно-технической конференции. – Воронеж: НОУ ВПО «Междунар. институт компьют. технологий». – 2017. – С. 35-38.

11. Сачавец, О.В. (Белоусова, О.В.) Программирование микропроцессорных регуляторов в Matlab 7.5 / О.В. Сачавец (О.В. Белоусова), Ю.С. Слепокуров // Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы науч.-техн. конф. – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет». – 2007. – С. 41-44.

12. Сачавец, О.В. (Белоусова, О.В.) Моделирование микропроцессорных регуляторов / О.В. Сачавец (О.В. Белоусова), Ю.С. Слепокуров // Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы науч.-техн. конф. – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет». – 2007. – С. 44-52.

13. Сачавец, О.В. (Белоусова, О.В.) Моделирование дискретных регуляторов систем автоматического управления / О.В. Сачавец (О.В. Белоусова), Ю.С. Слепокуров // Вычислительные машины, автоматика и робототехника: материалы науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. – Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет». – 2007. – С. 74-82.

Публикации в других научных изданиях

14. Анненков, А.Н. Моделирование электропривода центрифуги на базе бесконтактного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов /

А.Н. Анненков, О.В. Белоусова / Научные труды КубГТУ (электронный журнал). – 2021. – № 6. – С. 36-47.

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

Подписано в печать 03.02.2023.
Формат 60х84/16. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № 9

АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий»
394026 Воронеж, ул. Солнечная, 29 б

Отдел типографии Международного института компьютерных технологий
394026 Воронеж, ул. Солнечная, 29 б