

На правах рукописи



АЛЕШКИН Никита Андреевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА МИКРОКЛИМАТА
В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ БОРТОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность 05.02.22 – Организация производства
(радиоэлектроника и приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена на кафедре инноватики и интегрированных систем качества Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель

Семенова Елена Георгиевна

доктор технических наук, профессор,
Лауреат Премии Правительства Российской Федерации, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации

Официальные оппоненты

Тупик Виктор Анатольевич

доктор технических наук, доцент,
Заведующий кафедрой
микрорадиоэлектроники и технологии
радиоаппаратуры ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Дзюбаненко Сергей Владимирович

кандидат технических наук,
Начальник отдела центра
микросистемотехники ОАО «Авангард»

Ведущая организация

АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», 197372, Санкт-Петербург, Новосельковская, 37

Защита состоится «16» марта 2017 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «20» января 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.233.04
канд. техн. наук, доцент



Фролова Е.А.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Постоянное усложнение радиоэлектронных устройств, фактор импортозамещения, жесткие ограничения на параметры производственных процессов (ПП) ведут к тому, что управление ПП осуществляется в условиях априорной неопределенности вследствие неточности описания моделей наблюдения и состояния объекта управления, погрешности и неполноты измерительной информации, дрейфа характеристик технологического оборудования и т.п. В этих условиях важное значение при управлении ПП изготовления бортовой микроэлектроники приобретает информация качественного характера в виде знаний и опыта технологов. Корректное представление и использование такой информации в модели управления позволяет учесть сложные внутренние взаимосвязи исследуемого недостаточно структурированного технологического объекта. В трудах отечественных и зарубежных ученых в области автоматизации управления производством микроэлектроники описаны системы автоматического управления (САУ), в большинстве своем способные реализовывать лишь некоторый жесткий алгоритм и малоэффективные в условиях, требующих реализации гибких стратегий управления и принятия оперативных, адекватных и эффективных решений. Одним из таких процессов выступает процедура адаптивного управления климатической динамической системой (КДС). Анализ технологий производства микроэлектроники показывает, что при разработке моделей управления не все виды неопределенности учитываются и могут быть формализованы традиционно применяемыми аналитическими и статистическими методами, отсутствует ориентирование предлагаемых методов и средств управления на реализацию когнитивных, адаптивных и энергосберегающих технологий управления ПП.

Таким образом, актуальной является **научная задача** повышения результативности ПП изготовления бортовой микроэлектроники путем разработки методов и алгоритмов активного мониторинга, предполагающего адаптивное управление КДС, соответствующее тенденциям развития технологии прецизионного производства радиоэлектроники. При этом основное содержание методик и процедур управления составляет адекватная математическая модель операций, предусмотренных технологией производства и призванных рациональным образом удерживать в заданных границах климатические параметры ПП.

На сегодняшний день неиспользованным резервом повышения качественных показателей производства бортовой микроэлектроники представляется результативное совершенствование технологий автоматического управления климатом в ПП на основе синтеза интеллектуальных процедур принятия решения в условиях непрогнозируемых возмущений. Система мониторинга и обработки наблюдений климатических параметров, сопровождающая ПП, должна обеспечивать максимальный учет дополнительной информации, представленной как в аналитической (в том числе в виде ограничений неравенств), так и в лингвистической форме.

Актуальность совершенствования существующих и создания перспективных средств производства бортовой микроэлектроники подтверждается включением направлений «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения», «Технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта» и «Технологии информационных, управляющих, навигационных систем» в Перечень критических технологий РФ, утвержденный Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899, а

также осуществлением Государственной программы Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы», утвержденной распоряжением правительства от 15 декабря 2012 года № 2396-р.

Степень научной разработанности темы.

Вопросы организации производства получили развитие в работах Т.Р. Газизова, Ю.П. Морозовой, В.В. Витязева, Ю.Б. Зубарева, Ю.К. Фетисова, Е.Г. Семеновой, Г.И. Коршунова, В.М. Балашова, А.Е. Кучерявого, А.К. Казанцева, В.В. Ковалева, З.М. Юлдашева, А.А. Харина, В.В. Царева, О.Г. Морозова, Ю.Б. Гимпилевича, Д.С. Чирова, А.В. Васильева и др. Вопросы рекуррентного оценивания параметров динамических систем отражены в трудах Р. Калмана, И.А. Богуславского, М.Б. Невельсона, Ф.Н. Григорьева, В.В. Баранова, А.В. Макшанова и др. Вопросам применения нечеткой логики в технологических процессах посвящены работы М.В. Буракова, М.Л. Кричевского, Ю.В. Фролова, О.Т. Андреева, Н.Г. Малышева, А.Н. Павлова и др.

Наличие большого объема исследований не исключает недостаточную проработку теоретических вопросов устойчивого управления процессом изготовления микроэлектроники и необходимость развития научных, методологических и системотехнических основ организации ПП, совершенствования математических моделей и методов управления микроклиматом в технологии производства, разработки критериев и методик мониторинга и оценки результативности, устойчивости производственно-технологических комплексов (ПТК).

Это подтверждает актуальность темы исследования и позволяет сформулировать цель, задачи, объект и предмет исследования.

Цель диссертационного исследования - повышение результативности управления климатическими параметрами в производственном процессе изготовления бортовой микроэлектроники с учетом внутренних и внешних возмущающих факторов.

Исходя из сформулированной цели, в работе были поставлены и решены следующие **научные задачи**:

- совершенствование научных и системотехнических основ организации устойчивого адаптивного управления климатическими параметрами в ПП изготовления бортовой микроэлектроники;
- разработка математической модели поведения климатических параметров ПП с учетом внутренних взаимосвязей и возмущающих факторов;
- разработка методов и средств мониторинга климатических параметров ПП на основе рекуррентной фильтрации наблюдений в условиях нестационарных возмущений;
- разработка методики устойчивого автоматического управления микроклиматом в ПП на основе формирования управляющих воздействий при использовании нечеткого регулирования.
- разработка методики организации управления микроклиматом в ПП изготовления бортовой микроэлектроники, обеспечивающей реализацию ресурсосберегающих процедур и минимизацию технических рисков.

Предмет исследования – модели, методы и алгоритмы непрерывного устойчивого управления микроклиматом в ПП изготовления бортовой микроэлектроники.

Объект исследования – процесс влияния микроклимата производственных помещений на качественные параметры изготовления бортовой микроэлектроники.

Теоретической и методологической базой исследования послужили научные

труды отечественных и зарубежных ученых в области теории организации производства, теории управления производственно-технологическими системами и комплексами. Методологическую основу составляют методы системного анализа и синтеза, логического и сравнительного анализа, методы наблюдения, количественного оценивания, аналитические, статистические и прогностические методы. Информационной основой исследования являются материалы производственных предприятий, научно-исследовательских институтов и организаций, образовательных учреждений, научных и периодических изданий.

Тематика работы соответствует областям исследования пп. 3, 4, 5, 7, 10 паспорта специальности 05.02.22 – «Организация производства».

На защиту выносятся следующие результаты исследования:

- математическая модель поведения климатических параметров ПП с учетом внутренних взаимосвязей и возмущающих факторов;
- методика мониторинга микроклимата ПП на основе рекуррентной фильтрации наблюдений в условиях нестационарных возмущений;
- модель устойчивого автоматического управления микроклиматом в ПП на основе формирования управляющих воздействий при использовании аппарата нечеткого регулирования;
- методика организации управления микроклиматом в ПП изготовления бортовой микроэлектроники, обеспечивающая реализацию ресурсосберегающих алгоритмов и минимизацию технических рисков;
- предложения по модернизации ПП изготовления бортовой микроэлектроники в условиях импортозамещения, микроминиатюризации и необходимости обеспечения заданных характеристик качества, надежности, энергопотребления.

Научной новизной обладают следующие результаты исследования:

- результаты анализа особенностей организации и управления ПП изготовления бортовой микроэлектроники, учитывающие особые требования к климатическим параметрам в недостаточно структурированных производственных комплексах;
- принципы построения систем мониторинга ПТК и адаптивного управления климатическими параметрами, обеспечивающие повышение технологических показателей ПП;
- математическая модель поведения климатических параметров при реализации ПП с учетом внутренних взаимосвязей и возмущающих факторов;
- модель системы устойчивого автоматического управления КДС при реализации ПП на основе рекуррентного оценивания с нечеткой логикой;
- методика ресурсосберегающего управления микроклиматом в ПП изготовления бортовой микроэлектроники.

Практической значимостью обладают:

- научно – методический аппарат моделирования процесса функционирования КДС при реализации ПП изготовления бортовой микроэлектроники;
- методика организации ПП, основанная на рекуррентном нечетком управлении КДС в условиях ограничений на параметры состояния;
- методика и алгоритмы оценки характеристик КДС в ПП к воздействию возмущающих климатических факторов;
- технические рекомендации по совершенствованию программно-технологического обеспечения систем управления климатом в ПП при изготовлении изделий бортовой микроэлектроники.

Апробация работы: Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на VIII международной научно-практической конференции «Проблемы

и перспективы современной науки» (Москва, 2016 г.), Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в науке, технике, образовании» (Смоленск, 2016 г.), Международной научно-практической конференции «Новейшие достижения в науке и образовании» (Смоленск, 2016 г.), Международной научно-практической конференции «Теория и практика приоритетных научных исследований» (Смоленск, 2016 г.), Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в научной и образовательной деятельности» (Смоленск, 2015 г.), Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, секция «Радиолокация и радионавигация. Проектирование и технология производства РЭА» (АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург, 2014, 2016 гг.), 68-й и 69-й Международной студенческой научной конференции ГУАП (Санкт-Петербург, 2015, 2016 гг.)

Публикации: по результатам исследований, выполненных в диссертации, опубликовано 15 статей, в том числе 8 в ведущих рецензируемых научных изданиях, получено свидетельство о государственной регистрации «Базы данных состояний климатической системы в технологическом процессе производства микроэлектроники», рег. № 2016621383 от 13.10.2016г., свидетельство о государственной регистрации «Базы данных параметров математической модели системы автоматического управления микроклиматом в чистом производственном помещении», рег. № 2016621384 от 13.10.2016 г.

Внедрение результатов исследования: повышение результативности управления КДС в производственном процессе изготовления изделий бортовой микроэлектроники подтверждено актами об использовании, полученными автором от ОАО «НЦ ПЭ», АО «НПП «Радар ммс», ООО «ЛМТ», АО «НТЦ «Арикос», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Структура диссертационной работы: диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из 127 наименований. Текст диссертации изложен на 187 страницах, содержит 90 рисунков и 47 таблиц.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, отражена научная новизна и практическая значимость, приведены основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы технологии мониторинга и управления климатическими параметрами при изготовлении бортовой электроники, рассмотрены требования к КДС и САУ микроклиматом в производственных помещениях, выполнен анализ возможных рисков, сформулированы направления исследований по совершенствованию качественных показателей процесса производства бортовой микроэлектроники. Сближение норм проектирования электронных изделий и уровня микроэлектроники обусловило необходимость в обеспечении соответствующих им условий производства по основным климатическим параметрам ПП: температуре, влажности, давлению, уровню запыленности воздуха и др. Стандарт ГОСТ Р ИСО 14644 содержит информацию по обеспечению контролируемых параметров. В системах управления, используемых в чистых производственных помещениях (ЧПП) промышленных предприятий, соответствующих стандартам качества, процессы принятия решений протекают в условиях неопределенности в силу воздействия возмущающих факторов. Указанные помещения оборудуются КДС с комплексом датчиков для мониторинга ее текущего состояния, исполнительными агрегатами и механизмом управления последними по некоторому алгоритму. При

этом САУ КДС интегрируется в систему централизованного контроля и управления инженерными, технологическими, информационными и коммуникационными системами. Система управления, оценивая информацию от датчиков об окружающей среде и о текущем состоянии самой КДС, выбирает решение о последовательности действий (рисунок 1). Существует тенденция к применению интеллектуальных систем управления параметрами микроклимата, имеющих в своем составе аппарат адаптации и базу знаний, использование которых призвано обеспечить устойчивость к воздействию внешних факторов. Для этих целей предлагается создание комплекса аппаратно-программных средств, включающих систему мониторинга и автоматического поддержания установленных параметров в заданных пределах. Математическое обеспечение, на основе которого разрабатывается методика управления, должно отвечать требованиям адекватности происходящим в ЧПП процессам и гарантировать автоматическое восстановление норм характеристик динамической системы при их нештатном отклонении от эталона. При этом речь идет о синтезе процедур, гарантирующих сохранение предельных значений других элементов вектора контролируемых параметров микроклимата ПП.

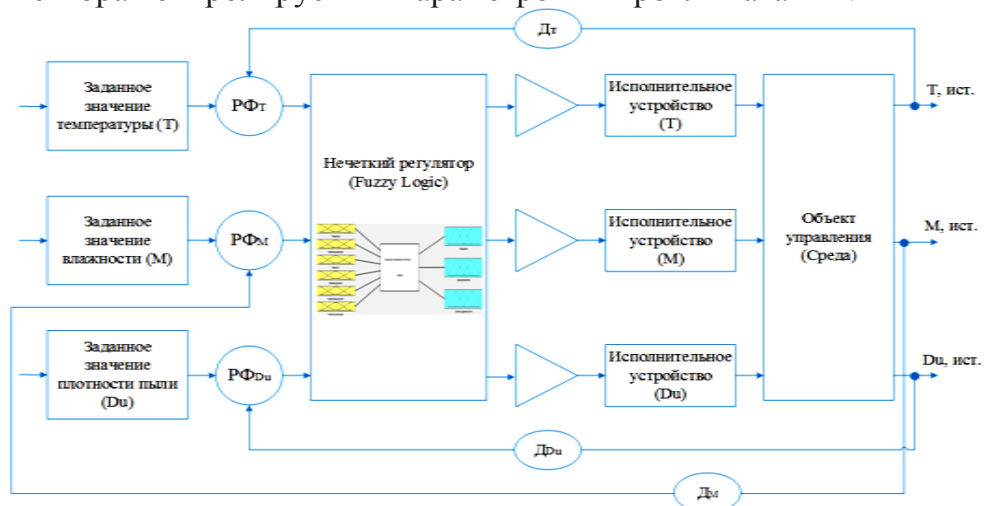


Рисунок 1 – Схема рекуррентного управления КДС с нечетким регулятором

Аналитически формализовать эти процессы в рамках теории классических САУ оказывается крайне сложной задачей. Для обеспечения непрерывности процессов мониторинга и управления целесообразно использовать рекуррентные схемы, в которых по итогам сравнения текущих и требуемых параметров пространства наблюдений принимается решение о выдаче управляющего воздействия на исполнительные органы. Однако взаимовлияние отслеживаемых параметров, их неоднородность и сложность математического описания как самих переменных состояния, так и их взаимосвязей делает уязвимой устойчивость и надежность функционирования подобных динамических систем. При отсутствии точного описания моделей состояния и наблюдения процесс слежения расходится, и погрешность оценивания становится недопустимо большой. Необходимо, чтобы динамическая система обладала свойствами адаптивной подстройки под меняющуюся ситуацию. Поэтому предлагается сопряжение технологии рекуррентного оценивания и адаптивной компенсации недоопределенности моделей поведения параметров КДС на основе нечетких правил формирования управляющего воздействия (рис. 1). Указанный подход призван минимизировать риск расходимости процесса поддержания состояния системы в заданных границах при различного характера возмущениях. Предложенное решение делает процесс управления климатическими параметрами ПП адаптивным, с максимальным учетом априорных

данных, что дает возможность построения робастных, отказоустойчивых систем управления производством бортовой микроэлектроники.

В первой главе проведен анализ существующих технологий управления микроклиматом ЧПП, обозначены мероприятия, необходимые для гарантирования надежности производства бортовой микроэлектроники при обеспечении требуемых значений контролируемых КДС параметров. Проведен патентный поиск и уточнен состав существующих разработок в области САУ микроклиматом, определены направления исследования в области сопряжения технологии рекуррентного оценивания и адаптивной компенсации недоопределенностей и возмущений на основе нечетких правил формирования управляющего воздействия. Синтез адаптивной САУ КДС на основе выбранных направлений обеспечит устойчивость управления ПП, минимизацию времени переходных процессов, ресурсосбережение и снижение рисков производства некачественных изделий.

Во второй главе представлены существующие подходы к реализации САУ КДС в ПП. Получены описания функциональной связи параметров микроклимата ПП с управляющими воздействиями и возмущениями, вызванными изменениями параметров внешней среды. Описания выполнены в виде дифференциальных уравнений и передаточных функций применительно к автоматизации процесса управления микроклиматом ПП.

Представлена обобщенная математическая модель параметров микроклимата ЧПП на основе многосвязной САУ и описания динамических свойств передаточными функциями. Особенностью модели является учет многосвязности объекта управления и внешних возмущений. Предложенная математическая модель использована при исследовании различных вариантов САУ и является более полной по сравнению с моделями, полученными ранее. Предложено рассматривать систему управления КДС в ПП изготовления микроэлектроники как комплексную систему оценивания и регулирования. Математическая модель управления параметрами микроклимата получена на основе балансных уравнений соответствующих параметров состояния. Наиболее значимыми параметрами КДС в ПП являются температура воздуха, его влажность и предельная концентрация пыли. Важно определить динамические зависимости этих параметров от управляющих воздействий и возмущающих факторов. При формализации температурного режима ПП учтены три тепловых потока: $Q_{ист}$ - тепло от источника (от системы отопления), $Q_{опр}$ - теплопотери через ограждающие конструкции ЧПП, $Q_{амм}$ - теплопотери на обогрев (охлаждение) атмосферного воздуха.

Зная внутренний объем помещения V , плотность воздуха ρ , его удельную теплоемкость C , запишем уравнение тепловой энергии, определяющей изменение температуры воздуха $T(t)$ внутри ЧПП:

$$\rho V C \frac{dT(t)}{dt} = Q_{ист}(t) - (Q_{опр}(t) + Q_{амм}(t)). \quad (1)$$

Управляющее воздействие подачи тепла от системы отопления характеризуется передаточной функцией $W_{T_2}(p)$ инерционного типа и направлено на компенсацию возмущений в виде потерь тепла через ограждающие конструкции, описанных передаточной функцией того же типа $W_{T_1}(p)$, и потерь тепла в процессе работы системы вентиляции по подготовке свежего наружного воздуха. Расход свежего воздуха определяется в процессе работы контура стабилизации качества воздуха, и его влияние на температуру $T(t)$ описано инерционным звеном с передаточной функцией $W_{T_3}(p)$.

Дифференциальное уравнение для влажности имеет вид:

$$\rho V \frac{dX(t)}{dt} = G_{амм}(t)X_{амм}(t) - G_{yx}X_{yx}(t) + G_{нар}(t), \quad (2)$$

где $X(t)$ – абсолютная влажность воздуха в ЧПП, $G_{амм}(t)$ – расход атмосферного воздуха, $X_{амм}(t)$ – абсолютная влажность атмосферного воздуха, $G_{yx}(t)$ – расход уходящего воздуха, $X_{yx}(t)$ – абсолютная влажность уходящего воздуха, $G_{нар}(t)$ – расход парогенератора.

Дифференциальное уравнение для концентрации пыли имеет вид:

$$\rho V \frac{dDu(t)}{dt} = G_{амм}(t)Du_{амм}(t) - G_{yx}(t)Du_{yx}(t) + G_{mc}(t), \quad (3)$$

где $Du(t)$ – управляющее воздействие (вентиляция помещения); $G_{mc}(t)$ – возмущающее воздействие (выделение пыли оборудованием); $Du_{амм}(t)$ – возмущающее воздействие (концентрация пыли в приточном воздухе), $Du_{yx}(t)$ – концентрация пыли в уходящем воздухе.

Аналогичным образом определены передаточные характеристики звеньев, с помощью которых может быть выполнено имитационное моделирование изменения влажности воздуха и концентрации пыли в ЧПП.

При разработке математической модели процесса мониторинга микроклимата использована технология рекуррентного оценивания. При несоответствии модели состояния рекуррентного фильтра реально сглаживаемому процессу возникает угроза его расходимости. Предложен подход борьбы с расходимостью, ориентированный на адаптивное нечеткое регулирование управляющих воздействий. На рисунке 2 проиллюстрирован процесс управления при наличии возмущающих факторов, парирование которых в рамках традиционных САУ оказывается невозможным, на рисунке 3 – графики для САУ на основе рекуррентной фильтрации с нечетким регулятором (НР).

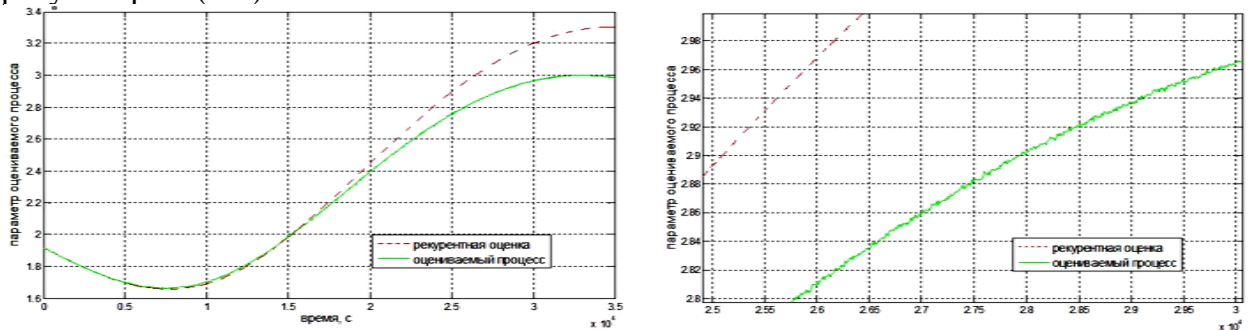


Рисунок 2 – Динамика оцениваемого параметра (пунктирная кривая) и его рекуррентная оценка (сплошная кривая) при отсутствии нечеткого регулирования (на всем интервале наблюдения- слева, укрупненный фрагмент наблюдаемого процесса- справа)

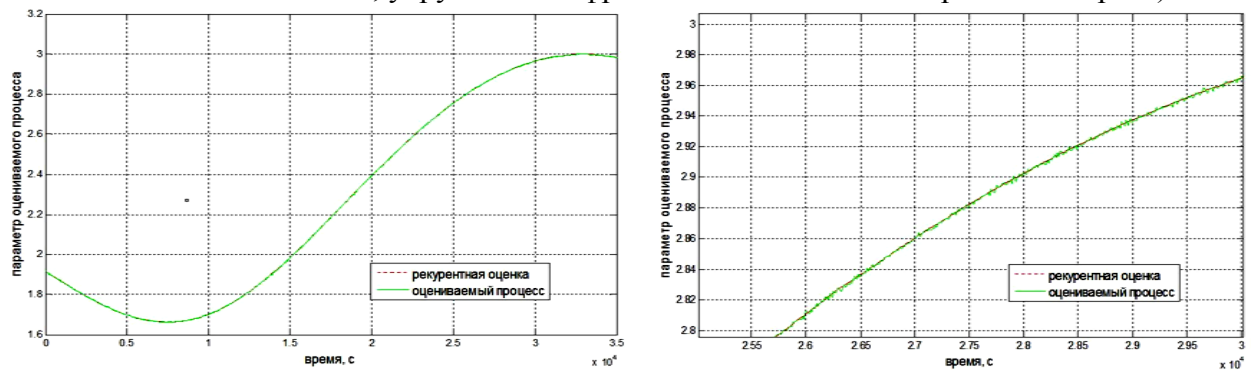


Рисунок 3 – Динамика оцениваемого параметра и его рекуррентная оценка при использовании процедуры нечеткого регулирования (на всем интервале наблюдения- слева, укрупненный фрагмент - справа)

Анализ представленных графиков указывает на возможность формирования управляющих воздействий, обеспечивающих заданную устойчивость системы управления климатом. Предложенное решение делает КДС адаптивной и дает возможность построения отказоустойчивых систем управления ПП при изготовлении микроэлектроники с гарантированным уровнем показателей риска.

В третьей главе обоснована целесообразность использования для автоматизации управления микроклиматом при производстве бортовой микроэлектроники интеллектуальных технологий, ориентированных на аппарат нечеткой логики. На основе анализа и обобщения опыта ПП разработана база правил для системы нечеткого управления, обеспечивающая адаптивную коррекцию выходного сигнала рекуррентного фильтра в условиях непрогнозируемых возмущений и уставок, определены функции принадлежности (ФП) для контролируемых параметров микроклимата, возмущений и управляющих воздействий, разработана математическая модель процедуры нечеткого вывода.

Поясним схему формирования лингвистических переменных для процесса обеспечения температурного режима в КДС. Введем переменную «Температура процесса» и определим ее термы. Диапазон температур $T_{\min}^{\circ\text{C}} \div T_{\max}^{\circ\text{C}}$ разобьем на интервалы ($\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$).

С учетом экспертного мнения задано пять термов (таблица 1).

Таблица 1 – Термы переменной «Температура процесса»

Диапазон температур, $^{\circ}\text{C}$	Характеристика терма	Обозначение терма
$<T_{\min}$	Температура пониженная	N
ΔT_1	Температура немного пониженная	SN
ΔT_2	Температура номинальная	Z
ΔT_3	Температура немного повышенная	SP
$>T_{\max}$	Температура повышенная	P

Для выбора ФП необходимо установить соответствие между физической величиной «температура воздуха» $T(t)^{\circ\text{C}}$ и термами лингвистической переменной. На практике используются ФП с упрощенным математическим описанием. Однако в случае с параметрами КДС необходимо обеспечить возможность адаптации процессов к вероятным отклонениям параметров. Полученные с учетом методики экспертного оценивания ФП описываются уравнениями полиномиальной аппроксимации.

Используем описанный для определения ФП температуры подход ко всем термам переменной «Температура процесса» (таблица 2).

Таблица 2 – Исходные данные для ФП термов «Температура процесса»

Терм	Ядро нечеткого множества терма	Носитель нечеткого множества	Левое плечо нечеткого множества	Правое плечо нечеткого множества
N	$19 \leq$	$(-\infty; 19)$	$(-\infty; 19)$	$(19; 20)$
SN	20	$(19; 21)$	$(19; 20)$	$(20; 21)$
Z	21	$(20; 22)$	$(20; 21)$	$(21; 22)$
SP	22	$(21; 23)$	$(21; 22)$	$(22; 23)$
P	≥ 23	$(22; +\infty)$	$(22; 23)$	$(23; +\infty)$

Аналогичным образом представлены ФП остальных контролируемых климатических параметров.

Управление параметрами микроклимата в КДС осуществляется путем изменения расхода теплоносителя калорифера для управления значением

температуры в ЧПП, расхода подачи пара в систему увлажнения для управления влажностью, расхода свежего воздуха системы вентиляции для управления концентрацией пыли. Управляющие воздействия представляют собой сигналы управления для названных исполнительных устройств.

Для описания воздействий в системе нечеткого управления введены лингвистические переменные: «Упр.Т» - для системы отопления, «Упр.М» - переменная для системы увлажнения, «Упр.Дu» - переменная для системы вентиляции. Для каждой переменной введем три термина и присвоим им соответствующие обозначения (таблица 3). Будем рассматривать наиболее общий случай управления, когда изменяется скорость движения исполнительных органов. Скорость перемещения исполнительного органа в рассматриваемом случае будет меняться в пределах $\pm(0 \dots 100 \%)$.

Таблица 3 – Управляющие воздействия

Управляющие воздействия на исполнительные механизмы		
Диапазон воздействия, %	Терм лингвистической переменной	Обозначение термина
-100...0	Закрывать	Cl
-10...10	Стоп	St
0...100	Открывать	Op

ФП управляющих воздействий изображены на рисунке 4.

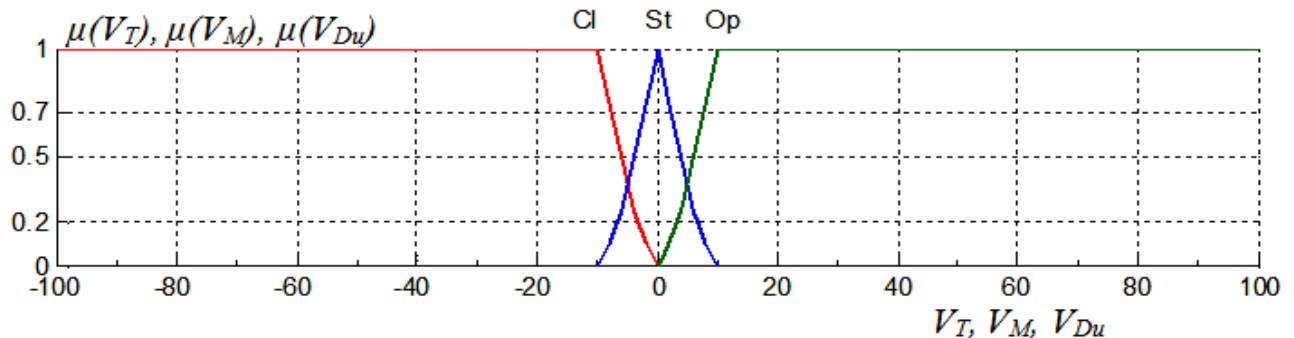


Рисунок 4 – ФП термов переменных «Упр.Т», «Упр.М», «Упр. Дu»

В результате решения задачи фаззификации сформулированы лингвистические переменные и их термы для описания состояния параметров микроклимата ПП и управления им, а также получены ФП, связывающие физические параметры процесса с лингвистическими переменными. Результаты описания представлены в таблице 4.

Алгоритм управления для НР описывается базой правил, которая разрабатывается на основе экспериментальных данных и накопленного опыта.

Затем разрабатываются правила нечеткого вывода:

$$\begin{aligned} \mu_{res}(V_t) &= \max \{ \min[\mu_i(T), \mu_x(T_{out}), \mu_y(Du_{out})] \}, \\ \mu_{res}(V_M) &= \max \{ \min[\mu_j(M), \mu_x(T_{out}), \mu_y(Du_{out})] \}, \\ \mu_{res}(V_{Du}) &= \max \{ \min[\mu_k(Du), \mu_x(T_{out}), \mu_y(Du_{out})] \}, \end{aligned} \quad (4)$$

где μ_{res} – результирующая ФП переменной управляющего воздействия;

V_T, V_M, V_{Du} – управляющие воздействия в канале управления температурой, влажностью и концентрацией пыли;

$T, M, Du, T_{out}, Du_{out}$ – значения температуры, влажности, концентрации пыли, наружной температуры и наружной концентрации пыли;

i, j, k – термы лингвистических переменных, описывающих состояние температуры, влажности и концентрации пыли;

Таблица 4 – Описание состояния КДС в терминах нечеткого управления

Физическая величина	Значение величины	Лингвистическая переменная	Термы лингвистической переменной	Характеристика термина
Температура воздуха в технологическом помещении, °С	$(-\infty; 19)$	Температура процесса, T	N	пониженная
	(18; 20)		Sn	немного пониженная
	(19; 21)		Z	номинальная
	(20; 22)		Sp	немного повышенная
	(21; 23)		P	повышенная
	$(22; +\infty)$		Bp	завышенная
Влажность воздуха в технологическом помещении, %	$(-\infty; 60)$	Влажность воздуха, M	N	пониженная
	(50; 70)		Sn	немного пониженная
	(60; 75)		Z	номинальная
	$(75; +\infty)$		Sp	немного повышенная
Концентрация пыли, частиц/м ³	$(-\infty; 400)$	Концентрация пыли, Du	Z	номинальная
	(400; 600)		SP	немного повышенная
	$(600; +\infty)$		P	повышенная
Наружная концентрация пыли, частиц/м ³	$(-\infty; 850)$	Наружная концентрация пыли, Du _{out}	Z	номинальная
	(750; 950)		Sp	немного повышенная
	$(850; +\infty)$		P	повышенная
Наружная температура, °С	$(-\infty; 10)$	Наружная температура, T _{out}	BN	заниженная
	(0; 20)		N	пониженная
	(10; 25)		Z	номинальная
	(20; 30)		SP	повышенная
	$(30; +\infty)$		P	завышенная
Скорость откр./закр. исполнительных механизмов	-100...0	Упр.T, Упр.M, Упр.Du	Cl	закрывать
	-10...10		St	Стоп
	0...100		Op	открывать

Таблица 5 – Термы и ФП входных лингвистических переменных

Переменные внутренних состояний процесса					
Термы переменной T, i	$\mu_i(T)$	Термы переменной M, j	$\mu_j(M)$	Термы переменной Du, k	$\mu_k(Du)$
N	$\mu_n(T)$	N	$\mu_n(M)$	Z	$\mu_z(Du)$
Sn	$\mu_{sn}(T)$	Sn	$\mu_{sn}(M)$	Sp	$\mu_{sp}(Du)$
Z	$\mu_z(T)$	Z	$\mu_z(M)$	P	$\mu_p(Du)$
Sp	$\mu_{sp}(T)$	Sp	$\mu_{sp}(M)$		
P	$\mu_p(T)$	P	$\mu_p(M)$		
Переменные внешних состояний процесса					
Термы переменной T _{out} , x	$\mu_x(T_{out})$	Термы переменной Du _{out} , y		$\mu_y(Du_{out})$	
Bn	$\mu_{bn}(T_{out})$	Z		$\mu_z(Du_{out})$	
N	$\mu_n(T_{out})$	Sp		$\mu_{sp}(Du_{out})$	
Z	$\mu_z(T_{out})$	P		$\mu_p(Du_{out})$	
P	$\mu_p(T_{out})$				
Bp	$\mu_{bp}(T_{out})$				

x , y – термы лингвистических переменных, характеризующих температуру окружающей среды и наружную концентрацию пыли.

Полный список термов и ФП, описывающих состояние параметров ТП, сведен в таблицу 5. В процессе вывода НР определяет значение ФП управляющих воздействий по каналу управления температурой, влажностью и концентрацией пыли в терминах нечеткого управления.

Для определения физической величины управляющих воздействий необходимо выполнить дефазсификацию логических значений управляющих воздействий. Для этой процедуры использован распространенный метод центра тяжести.

Алгоритм реализации методики нечеткого управления КДС представлен на рисунке 5. Matlab-модель управления климатическими параметрами в автоматическом режиме при использовании нечеткого регулятора изображена на рисунке 6 и состоит из НР с базой продукционных правил и структуры со звеньями, которые учитывают инерционность объекта управления.

НР представлен блоком FuzzyClimateControl, имеющим 5 входов (T , M , Du , T_{out} , Du_{out}), значения которых подвергаются фазсификации, после чего осуществляется процедура нечеткого вывода и формирования управляющих воздействий в соответствии с базой продукционных правил, описанной в среде компьютерной математики Matlab Fuzzy Logic Toolbox.

В процессе исследования системы нечеткого управления были проанализированы переходные процессы для управляемых параметров $T(t)$, $M(t)$, $Du(t)$, возникающие при возмущении внешних по отношению к процессу условий (температуры $T_{out}(t)$ и концентрации пыли $Du_{out}(t)$ во внешней среде). Графики переходных процессов приведены на рисунке 6, а их количественный анализ представлен в таблице 6. Анализ графиков позволяет утверждать, что НР обеспечивает приведение контролируемых КДС процессов в рекомендуемое состояние за существенно меньший интервал времени, чем классические САУ.

Оценка качественных характеристик проведена по следующим основным показателям: $t_{рег}$ - время регулирования (с); γ - перерегулирование (%); ω - частота колебаний; n - число колебаний; t_{max1} - время достижения первого максимума; t_n - время нарастания переходного процесса; χ - декремент затухания.

Таблица 6 – Показатели качества переходных процессов

Показатель качества	Возмущение 1		Возмущение 2		Возмущение 3	
	ПИД	НР	ПИД	НР	ПИД	НР
$t_{рег}$, с	4	1.5	3	1.2	3	1.5
γ , %	61	40	35	9	3	1
ω	9,4	8	8	7	9	9
n	5	2	4	2	5	3
t_{max1}	0.2	0.25	0.6	0.6	0.5	0.5
t_n	0.16	0,1	0.3	0,5	0.3	0.4
χ	4	19	3	4	2.5	8

По представленным данным могут быть сделаны следующие выводы.

Возмущение 1. САУ с НР обеспечивает меньшее время переходного процесса, чем ПИД-регулятор (преимущество 62,5 %) и меньшие значения величины перерегулирования (35%), частоты (16%), числа колебаний (60%), а также большее значение декремента затухания (83%).

Возмущение 2. САУ с НР обеспечивает меньшее время переходного процесса (60%), перерегулирование (74%), число колебаний (50%).

Возмущение 3. САУ с НР обеспечивает меньшее время переходного процесса (50%), перерегулирование (67%), число колебаний (40%) и большее значение декремента затухания (69%).

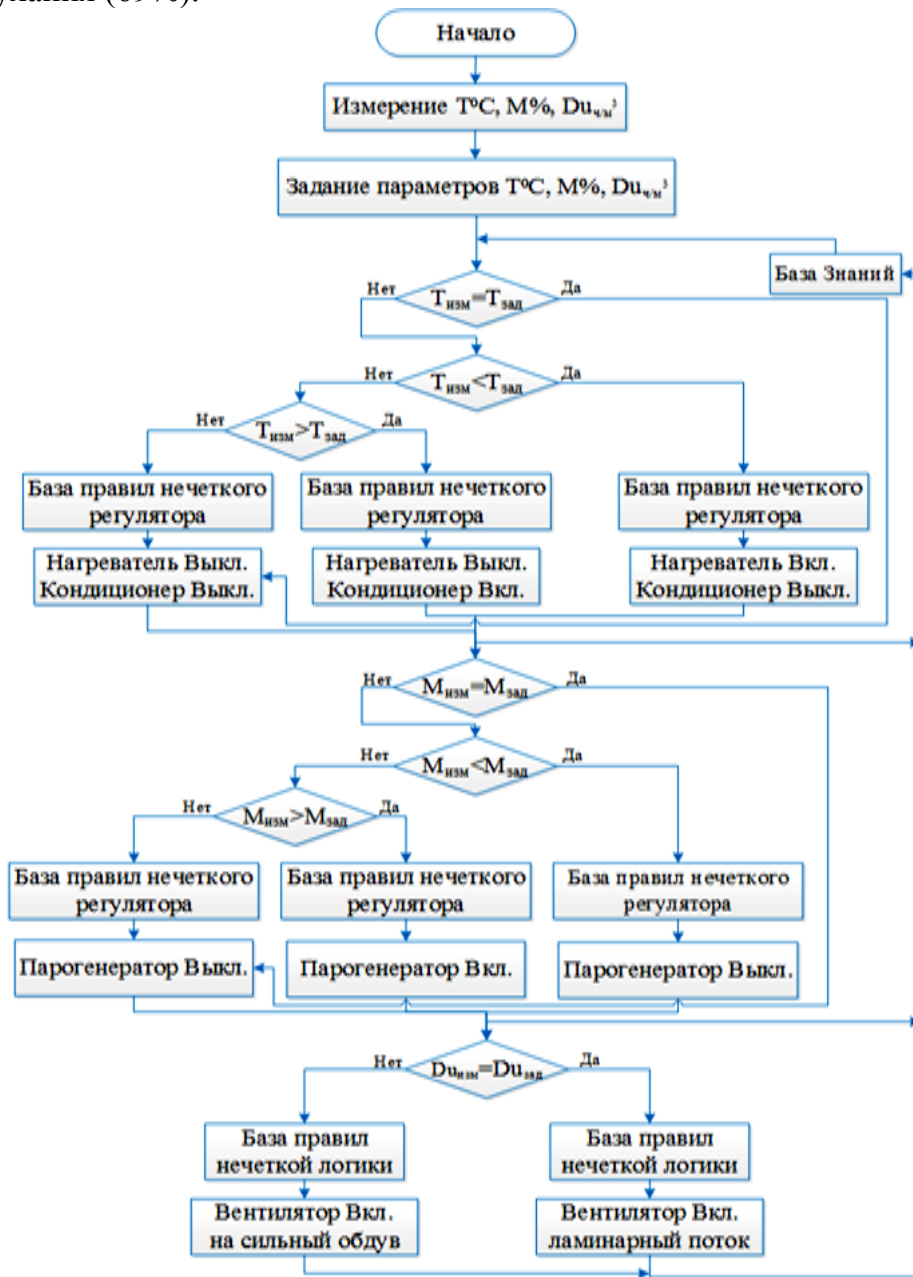


Рисунок 5 – Алгоритм реализации процедуры нечеткого управления КДС

Сравнительный анализ качества функционирования разработанной САУ КДС на основе рекуррентного регулятора с нечеткой логикой и классического ПИД-регулятора проиллюстрирован на рисунке 7. Исследования показали:

- разработанная САУ, комплексирующая рекуррентную фильтрацию и НР, обеспечивает адекватную реакцию на управляющие и возмущающие воздействия и характеризуется заданным качеством переходных процессов;

- при изменении внешних условий функционирования реализуется адаптация КДС ПП за счет соответствующего нечеткого регулирования параметров технологического режима;

- алгоритм адаптации системы определяется базой правил нечеткого управления, которую можно модернизировать в процессе эксплуатации системы, обеспечивая ее развитие.

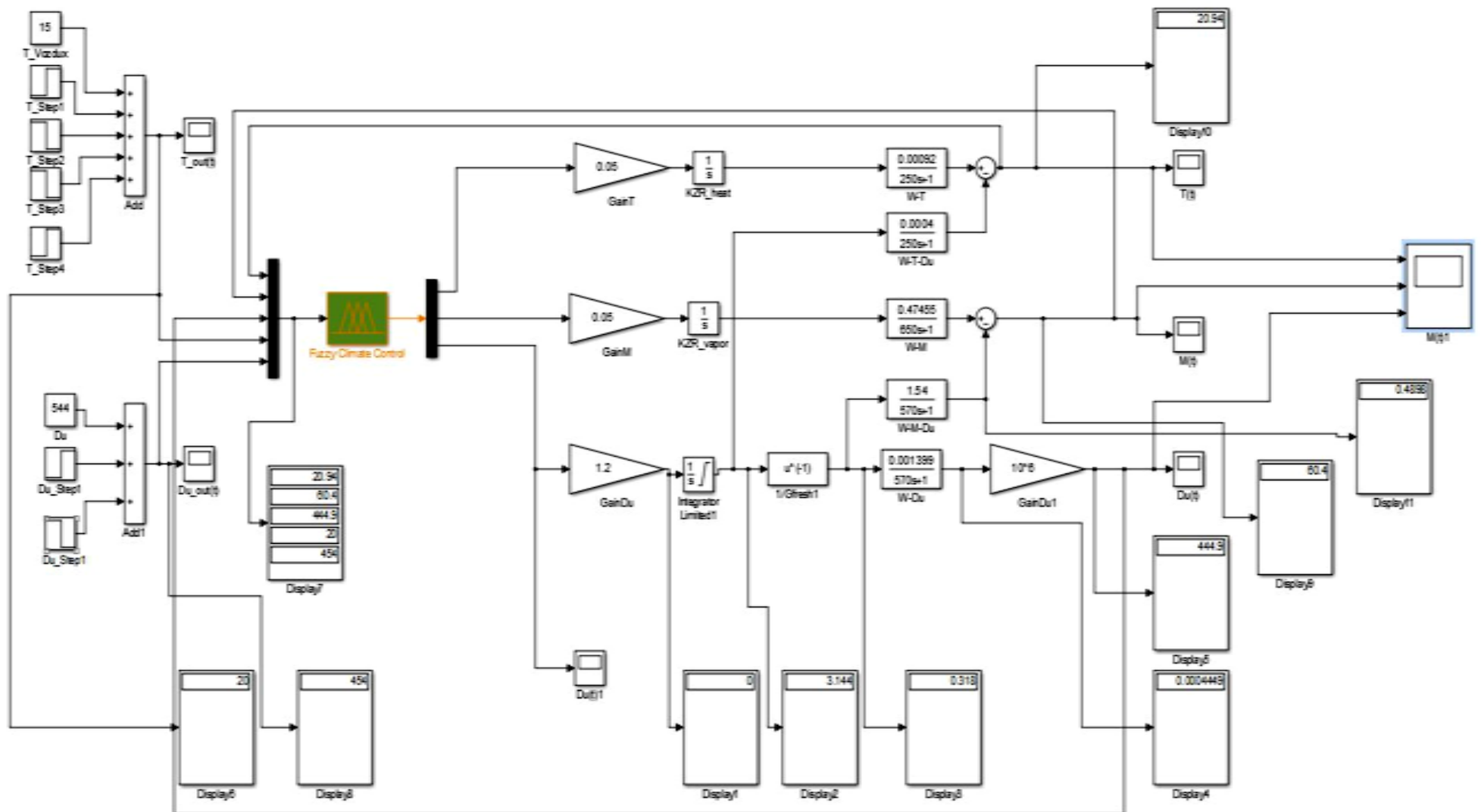


Рисунок 6 – Модель управления КДС с нечетким регулятором параметров микроклимата в ПП

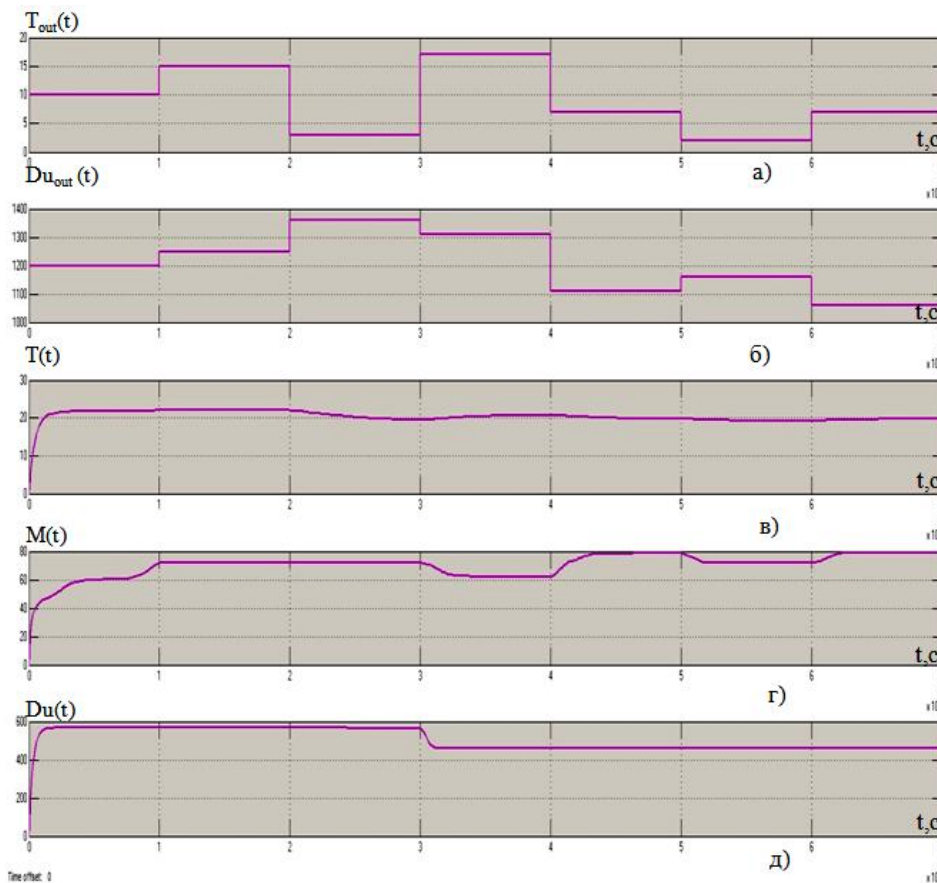


Рисунок 7 – Графики переходных процессов в системе: (а) – график наружной температуры, (б) – график наружной концентрации пыли, (в) – график температуры процесса, (г) – график влажности воздуха, (д) – график концентрации пыли

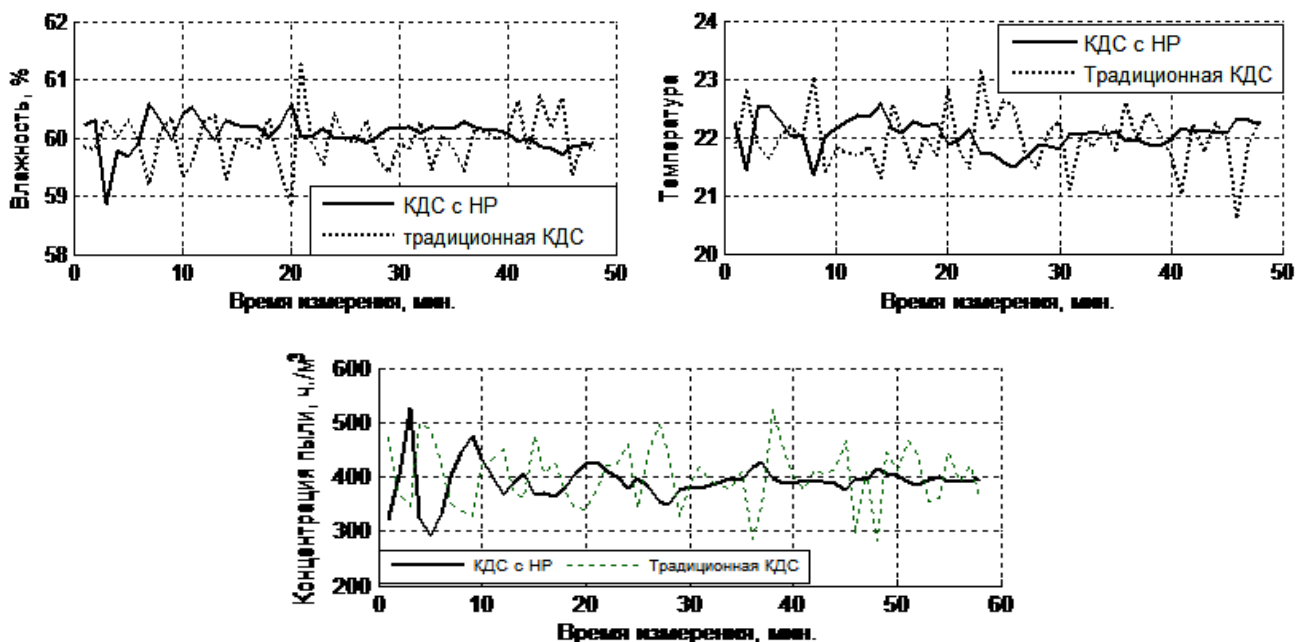


Рисунок 8 – Переходной процесс как реакция на возмущение микроклимата

Таким образом, исследование подтвердило правильность принципиальных решений по комплексированию рекуррентной фильтрации и нечеткого управления в КДС и достижимость сформулированных целей совершенствования ПП.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения результативности ПП изготовления бортовой микроэлектроники путем разработки методов и алгоритмов адаптивного управления микроклиматом в ЧПП, реализованная на основе концепции комплексирования рекуррентной фильтрации и нечеткого регулирования. В процессе выполнения работы были получены следующие результаты, имеющие научное и практическое значение:

- математическая модель поведения климатических параметров ПП с учетом внутренних взаимосвязей и возмущающих факторов;
- методика мониторинга микроклимата ПП на основе рекуррентной фильтрации наблюдений в условиях нестационарных возмущений;
- методика устойчивого автоматического управления микроклиматом в ПП на основе формирования управляющих воздействий при использовании аппарата нечеткого регулирования;
- методика организации управления микроклиматом в ПП изготовления бортовой микроэлектроники, обеспечивающая реализацию ресурсосберегающих процедур и минимизацию технических рисков;
- предложения по модернизации ПП изготовления бортовой микроэлектроники в условиях импортозамещения, микроминиатюризации и необходимости обеспечения заданных характеристик качества, надежности, энергопотребления.

Разработанная САУ КДС обеспечивает время переходного процесса меньше в 1,3 - 2,7 раза, чем ПИД-регулятор, характеризуется меньшими значениями величины перерегулирования частоты (в 1,25 – 2,2 раза), числа колебаний (в 1,12 – 1,33 раза) и большим значением декремента затухания (2,3 - 3,7 раза).

Внедрение основных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе подтверждено актами, полученными автором от ОАО «НЦПЭ», АО «НПП «Радар ммс», ООО «ЛМТ», АО «НТЦ «Арикос», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

IV. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Алёшкин, Н.А. К вопросу о совершенствовании интеллектуальных технологий аппаратно-программного обеспечения при управлении качеством производства специальной микроэлектроники / Н.А. Алёшкин // Вопросы радиоэлектроники: серия «Радиолокационная техника». 2015. Вып. 4, С. 150-160.
2. Алёшкин, Н.А. Автоматическое управление микроклиматом в производственных помещениях на основе реализации процедур нечеткого регулирования / Н.А. Алёшкин // Изв. вузов: Приборостроение. 2016. Т. 59. №9. С. 787-789.
3. Алёшкин, Н.А. Динамическая модель концентрации пыли для САУ производством микроэлектроники / Н.А. Алёшкин // Изв. вузов: Приборостроение. 2016. Т. 59. № 10. С. 884-887.
4. Алёшкин, Н.А. Совершенствование систем автоматического регулирования климатических параметров технологического процесса при производстве микроэлектроники в условиях возмущений / Н.А. Алёшкин, Е.Г. Семенова // Вопросы радиоэлектроники: серия «Радиолокационная техника». 2016. Вып. 6. С. 57-61.
5. Алёшкин, Н.А., Математическая модель автоматического управления вектором состояния недоопределенной динамической системы на основе принципов нечеткого регулирования / Н.А. Алёшкин, В.М. Балашов, В.Ю. Терещенко // Вопросы радиоэлектроники: серия «Радиолокационная техника». 2015. Вып. 4. С. 160-172.
6. Алёшкин Н.А., Иванов Д.В. Устойчивое оценивание вектора состояния динамической системы с неточно заданной матрицей наблюдения путем адаптивной

формализации априорных ограничений в виде неравенств в условиях интенсивных шумов измерений / Н.А. Алёшкин, Д.В. Иванов // Вопросы радиоэлектроники: серия Общетеchnическая. 2016. Вып. 2. С. 77-82.

7. Алёшкин, Н.А. Определение путей совершенствования климатических динамических систем в производственном процессе изготовления микроэлектроники на основе анализа патентной активности / Н.А. Алёшкин, А.А. Петрушевская // Вопросы радиоэлектроники: серия Общетеchnическая. 2016. Вып. 10. С. 61-67.

8. Алёшкин, Н.А. Роль проведения патентных исследований при разработке системы управления микроклиматом/Н.А. Алёшкин, А.А. Петрушевская// Интеллектуальная собственность. Промышленная собственность. 2016. №11. С.61-67.

Свидетельства о государственной регистрации

1. Алёшкин Н.А. Свидетельство о государственной регистрации «Базы данных состояний климатической системы в технологическом процессе производства микроэлектроники», рег. № 2016621383 от 13.10.2016г.

2. Алёшкин Н.А. Свидетельство о государственной регистрации «Базы данных параметров математической модели системы автоматического управления микроклиматом в чистом производственном помещении», рег. № 2016621384 от 13.10.2016 г.

Статьи в прочих изданиях

1. Алёшкин, Н.А. Математическая модель поведения параметров состояния динамической системы мониторинга микроклимата в производственном помещении для изготовления микроэлектроники / Н.А. Алёшкин // Проблемы и перспективы современной науки: сб. ст. / ISI-journal. 2016. С. 65-72 .

2. Алёшкин, Н.А. Обеспечение устойчивости динамической системы управления климатом помещений производства изделий бортовой радиоавионики / Н.А. Алёшкин // Современные тенденции в науке, технике, образовании: сб. науч. тр. / ООО «НОВАЛЕНСО». 2016. С.35-38.

3. Алёшкин, Н.А. Пути улучшения качества управления климатическими параметрами в технологическом процессе производства бортовой электроники / Н.А. Алёшкин // Радиолокация и радионавигация. Проектирование и технология производства РЭА: сб. докладов / АО «НПП «Радар ммс». 2016. С.4-7.

4. Алёшкин, Н.А. Разработка математической модели мониторинга параметра запыленности промышленного помещения при производстве микроэлектроники // Теория и практика приоритетных научных исследований: сб. науч. тр. / ООО «НОВАЛЕНСО». 2016. С.14-16.

5. Алёшкин, Н.А. Совершенствование технологий автоматического управления микроклиматом при производстве микроэлектроники на основе синтеза интеллектуальных процедур в условиях непрогнозируемых возмущений / Н.А. Алёшкин // Инновационные направления в науке, технике, образовании: сб. науч. тр. / ООО «НОВАЛЕНСО». 2016. С.79-81.

6. Алёшкин, Н.А. Модернизация системы управления климатическими параметрами в производственном процессе изготовления микроэлектроники при проведении патентных исследований / Н.А. Алёшкин, А.А. Петрушевская // Решение. 2016. Т. 1. С. 90-92.

7. Алёшкин, Н.А. Комплексирование рекуррентного фильтра и нечеткого регулятора в целях улучшения параметров качества технологического процесса производства микроэлектроники / Н.А. Алёшкин // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб.докл. / СПб.: ГУАП. 2016. С. 52-56.

Печатается в авторской редакции

Печать офсетная Формат 60×84 1/16 Тираж 100 экз.

Бумага офсетная
Заказ №

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская улица, д.67