

На правах рукописи



ИВАНОВ Владимир Константинович

**РАЗРАБОТКА И РЕШЕНИЕ  
ОСНОВНОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ МЕЛКОСЕРИЙНЫМ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами  
(в машиностроении)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Йошкар-Ола – 2017

Работа выполнена на кафедре транспортно-технологических машин  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Научный консультант: **Дмитриев Сергей Васильевич**, Заслуженный деятель науки Республики Марий Эл, доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей, автомобильных двигателей и дизайна Набережночелнинского института (филиал) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Официальные оппоненты: **Дворянкин Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»;

**Роднищев Николай Егорович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»;

**Шляев Сергей Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей и металлообрабатывающего оборудования ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина»

Защита состоится «30» июня 2017 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.31 в Набережночелнинском институте (филиале) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 13А, УЛК-5, ауд.309.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» и на сайте <http://www.kpfu.ru>.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 423810, Татарстан, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, диссертационный совет Д 212.081.31.

Автореферат разослан «  »                      2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент



Мавлеев И.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В связи с переходом страны к рыночным отношениям проблема автоматизации и управления технологическими процессами и производствами, создания производственных систем, способных к быстрой переналадке и переподготовке производства, модификации или замены продукции становится всё более и более актуальной. Рынок требует гибкости производства, т.к. резкое расширение номенклатуры и частое появление новых изделий, модернизация уже выпускаемых, разнообразие требований потребителя к выпускаемым изделиям и увеличение сложности продукции машиностроения привели к тому, что преобладающим типом производства становятся производственные системы, осуществляющие мелкосерийное многономенклатурное производство сложных, непрерывно обновляемых объектов производства. При этом существенно нестационарными являются условия подготовки и режимы эксплуатации оборудования при переходе от одного изделия к другому. Выполнение этого перехода и нахождение наиболее рационального решения из множества возможных при заданных ограничениях представляет собой сложную многокритериальную задачу.

Разработка и решение основной задачи управления автоматизированным мелкосерийным машиностроительным производством путем создания теоретических основ, методов и алгоритмов управления рассматриваемого класса объекта автоматизации представляет собой актуальную проблему, т.к. она ориентирована на существенное повышение эффективности мелкосерийного машиностроительного производства.

**Объектом исследований** является математическое моделирование, основная задача управления (ОЗУ) производственными системами и процессами мелкосерийного машиностроения.

**Предметом исследований** выступают математические модели, методы и средства моделирования, проектирования и управления подсистемами производственной системы, позволяющие определять их параметры и характеристики, решать задачи анализа, синтеза и оптимизации.

**Степень разработанности темы.** Теоретические и экспериментальные исследования в области автоматизации управления мелкосерийным машиностроительным производством представлены в работах отечественных ученых П.Н. Белянина, А.И. Богомолова, Н.Т. Бусленко, А.А. Вавилова, А.А. Волковича, А.Ф. Волошина, Г.Л. Дегтярева, С.В. Дмитриева, Р.Р. Загидуллина, М.Н. Калачева, Ю.В. Кожевникова, В.Н. Куршева, А.А. Лебедева, Л.Ю. Лицинского, И.М. Макарова,

С.Н. Падалко, С. А. Пиявского, В.М. Пономарева, Т.К. Сиразетдинова, Ю.М. Соломенцева, А.Д. Цвиркуна, Я.З. Цыпкина, а также зарубежных ученых Р. Гомори, Дж.Б. Данцига, В. Дойга, С.М. Джонсона, Л. Клейн-рока, Р.В. Конвея, Дж. Литла, А. Лэнда, Д. Мако, М. Месаровича, Т. Нейлора, Дж. Роберта, И. Такахары, Г.П. Шибанова, Т. Шрайбера.

Несмотря на то, что разрабатываются методы и средства комплексной автоматизации типа CALS/ИПИ/PLM-технологии и системы класса ERP, APS, MES (SAP R/3, Ваан, Галактика, Парус, 1С: Предприятие 8, UniSim и др.), остаются до конца не решенными актуальные научные проблемы построения математических моделей и на их основе создание методов и средств автоматизации управления технологической подготовкой производства, в частности:

- построение математических моделей отдельных подсистем производственной системы и создание проблемно ориентированной комплексной математической модели мелкосерийного машиностроительного производства;

- создание новых методов и средств автоматизации и управления производственными системами и процессами;

- реализация математических моделей, методов и алгоритмов в виде комплекса проблемно ориентированных программ, объединенных в интегрированную MES (Manufacturing Execution Systems) систему, которая может быть включена в существующие ERP (Enterprise Resource Planning) системы для построения производственного процесса, удовлетворяющего заранее заданным техническим условиям.

**Цель диссертационного исследования** – разработка новых методов и средств автоматизации технологической подготовки производства на основе идей основной задачи управления в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства.

**Методы исследования** включают в себя подходы и методы теории систем, теории управления, численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, методы математического программирования.

**Достоверность и обоснованность результатов.** Моделирование основано на общепринятых допущениях теории управления, исследовании производственных процессов для реальных условий функционирования предприятий, а полученные результаты сравнивались с производственными данными. Обоснованность результатов достигается благодаря соблюдению основных принципов системного подхода, математической строгости доказательств и выводов теоретических положений, ме-

тодов и алгоритмов расчета, основанных на фундаментальных законах теории управления и вычислительной математики.

**Практическая значимость (полезность)** исследования состоит в том, что теоретические положения, методы и средства, алгоритмы и программы диссертационной работы позволяют создать практические методы решения частных задач автоматизации и управления технологическими процессами в условиях мелкосерийного производства, с частичной или полной автоматизацией, удовлетворяющих заданным техническим условиям (ограничениям) на показатели качества (целевые критерии), применять их на этапе предварительного проектирования таких систем. Результаты работы могут быть применены для исследования и синтеза допустимых по условиям технического задания характеристик других более сложных технических систем.

#### **Научная новизна.**

1. Предложены новый метод и алгоритм автоматического формирования рациональных технических условий, технологических и эксплуатационных требований (ТЭТ) как дальнейшее развитие основной задачи управления.

2. Разработан новый способ описания структуры системы автоматического управления производственным модулем (станком, роботом), отличающийся от известных простотой в освоении и универсальностью (применим для широкого класса систем управления).

3. Предложены оригинальный численный метод и алгоритм автоматического преобразования описания структуры системы управления в математическую модель.

4. Модифицированы методы решения основной задачи управления применительно к математическим моделям производственной системы (уровня цеха). Получены рациональные параметры (компоненты вектора управления), которые позволяют оценить возможности производства.

5. Предложен комплексный подход к аналитическому решению основной задачи управления автоматизированным мелкосерийным машиностроительным производством. Разработанная структура математической модели многоуровневой производственной системы отличается от известных введением между уровнями проблемно ориентированных взаимосвязей, когда управляющие функции и параметры подсистемы верхнего уровня являются критериями качества для подсистемы следующего нижнего уровня. Это позволяет находить в соответствии с предложенными алгоритмами рациональные решения по управлению мелкосерийным машиностроительным производством.

6. Реализованы разработанные методы и алгоритмы как комплекс проблемно ориентированных программ, представленных в виде интегрированной системы, решены задачи моделирования и основная задача управления для производственного модуля, участка и цеха, различных по сложности реальных технологических процессов машиностроительного производства.

**Решены следующие конкретные задачи:**

- моделирования и основная задача управления для производственного модуля (системы управления станка с ЧПУ с различными типами приводов);
- управления плановым заданием производственного участка и анализа влияния его параметров на производительность участка, загрузку станков и транспортной системы;
- моделирования работы производственной системы на уровне цеха и основная задача управления для различных по сложности технологических процессов (число варьируемых параметров – 2, 4, 6, 18, 27, критериев качества – 2, 4, 6, 12, 18).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Новый метод автоматического формирования технических условий и ТЭТ, позволяющий решать задачи прогнозирования развития системы. При заданных ограничениях на показатели качества системы (область технических условий) в пространстве целевых критериев область ТЭТ в пространстве управлений (проектных параметров системы) станет автоматически целенаправленно перемещаться в направлении, где основная задача управления будет иметь решение.

2. Способ описания структуры системы управления станком и роботом. Является простым в освоении (правила описания содержат шесть пунктов и девять символов), достаточно универсальным (позволяет описывать структурные схемы, различные по степени сложности: одноконтурные, многоконтурные, многосвязные с перекрещивающимися связями).

3. Метод и алгоритм автоматического формирования математической модели. Основан на описании структуры системы управления и трансляции этого описания в формальную систему уравнений связи, включает:

- получение смешанной системы уравнений с постоянными коэффициентами на основе уравнений связи и матрицы функциональных элементов, которые хранятся в базе данных;
- окончательное осуществление преобразования этой системы уравнений в форму, удобную для дальнейших исследований.

4. Модифицированный метод решения основной задачи управления. Имеет комплексный характер в силу того, что в нем кроме количества деталей, оборудования и специалистов, времени обработки учитывается стоимость изготовления продукции.

5. Комплексная многоуровневая система математических моделей. Получается в результате установления связей между производственной программой цеха (проектный параметр), которая превращается в целевой критерий для участка (производительность), динамическими характеристиками оборудования производственного участка, являющимися целевыми критериями для системы управления оборудованием производственного модуля (станков и роботов с ЧПУ, привода роботоманипулятора и станка, транспортно-накопительной системы).

6. Комплекс проблемно ориентированных программ моделирования и решения основной задачи управления мелкосерийным машиностроительным производством. Программы объединены в интегрированную систему, которая является открытой, позволяет решать как частные задачи на уровне производственного модуля, участка и цеха для различных типов технологических процессов, числа варьируемых параметров и критериев качества, так и задачи анализа, синтеза и оптимизации характеристик других более сложных технических систем.

**Практическая реализация.** Исследования проводились в соответствии:

- с приказом № 330 от 04.07. 1980 г. п/я М-5804 и «Перспективной комплексной программой автоматизации и совершенствования технологии механообрабатывающего производства на 1981-1985 гг.»;

- положением на создание научно-технической продукции, утвержденным Госкомитетом СССР по науке и технике от 19.11.1987 г. № 435 и х/д темой № 8813 «Система комплексной автоматизации, конструирования, технологии и изготовления деталей в ГПС» с п/я Р-6621.

Методы и алгоритмы описания структур сложных систем автоматического управления, автоматического формирования математических моделей и решения основной задачи управления реализованы в виде подсистемы автоматизации и внедрены в практику реального проектирования на предприятиях авиационной промышленности и машиностроения.

Теоретические и практические результаты диссертационной работы, в том числе их программная реализация, были использованы:

- при проектировании и создании комплексно-автоматизированного механообрабатывающего цеха (КАМЦ) на ПО «Марийский машиностроительный завод», входящего в состав ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей»» (г. Москва);

- при выполнении выпускных квалификационных работ на механико-машиностроительном факультете Поволжского государственного технологического университета.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует п. 4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация», п. 10 «Методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и др.», п. 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)», п. 17 «Использование методов автоматизированного проектирования для повышения эффективности разработки и модернизации АСУ» паспорта специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в машиностроении)».

**Апробация результатов исследований.** Результаты исследований докладывались и обсуждались в период с 1977 по 2016 гг. на 17 всесоюзных научно-технических конференциях и симпозиумах, на кафедре прикладной математики Московского физико-технического института, в проблемной лаборатории математических методов оптимального проектирования Поволжского государственного технологического университета, Вавиловских чтениях в г. Йошкар-Оле, а также на кафедре «Автоматизация и информационные технологии» в Камской государственной инженерно-экономической академии (ИНЭКА) в г. Набережные Челны, на кафедре «Динамика процессов и управления» в Казанском национальном исследовательском техническом университете имени А. Н. Туполева – КАИ.

**Личный вклад автора** заключается в разработке концепции и формулировании цели работы, определении направлений теоретических и экспериментальных исследований, определении задач и принципиальных методологических и методических положений, организации и проведении комплексных исследований, обобщении положений.

Основные научные результаты получены автором лично. Из 48 работ по теме диссертации 33 написаны без соавторов. В приведенном списке научных работ из опубликованных в соавторстве лично соискателем предложены: в [1] – алгоритм формирования рациональных технических условий, технологических и эксплуатационных требований; в

[15] – подход к использованию методов теории автоматического управления для описания структуры системы управления производственным модулем; в [3, 16] – реализован метод случайного поиска при выборе рациональных параметров сложных технических систем, в [29] – метод и алгоритм решения основной задачи управления для производственной системы.

**Структура и объем.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа изложена на 290 страницах, включая 73 рисунка и библиографический список, состоящий из 199 литературных источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается обзор работ, посвященных вопросам моделирования, автоматизации и управления, определены цель, задачи и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, структура диссертации.

**Первая глава «Производственная система и основная задача управления»** посвящена анализу проблемы автоматизации и управления производственными системами и процессами, свойствам, структуре и выполняемым функциям производственной системы, которая рассматривается как сложная многоуровневая, многокритериальная, многорежимная функционирующая система. Одной из основных задач в управлении всегда являлась задача управления сложной системой (в смысле принятия решений), имеющей как множество параметров, так и множество критериев функционирования. Управление современным производством включает в себя большое количество общих задач на разных уровнях: от управления оборудованием, приводами станков до управления финансовыми потоками предприятия. Управляемость – один из важнейших критериев любого предприятия, живущего в условиях динамичной рыночной среды.

Отличительной особенностью современного этапа создания новых машин, технологического оборудования является достаточно быстрая смена образцов изделий, переход к более современным конструкциям и технологиям. При этом существенно нестационарными являются условия подготовки и режимы эксплуатации множества оборудования мелкосерийного производства машиностроительных предприятий. Это объясняется тем, что переход от одного изделия (или группы изделий) к другому вызывает необходимость переналадки не только станочного и

сборочного оборудования, промышленных роботов, транспортных систем, но и смену режимов работы всего производственного участка, а в отдельных случаях – и цеха. Выполнение этого перехода в условиях действия комплекса технических, технологических, эксплуатационных ограничений (обусловленных главным образом характеристиками оборудования), дополнительных ограничений на время нахождения наиболее рационального решения из множества возможных представляет собой сложную многокритериальную задачу.

Задача проектирования и управления сложными техническими системами тесно связана с задачей оптимизации. Существующие подходы поиска оптимальных значений параметров таких систем по отдельным критериям и их модификациям не всегда приводят к желаемым результатам. При этом после реальной проработки системы ее параметры будут отличаться от найденных, или же проект вообще может не удовлетворить инженера, хотя и удалось его реализовать.

Опыт проектирования многих технических систем показывает, что более рациональным является сохранение качественных свойств объекта проектирования в разумных пределах, исходя из технических условий на проектируемую систему, которые задаются в виде неравенств на функционалы или критерии качества (целевые критерии). Идея решения задачи в такой постановке связана с работами Т. К. Сиразетдинова и А. И. Богомолова по аналитическому проектированию сложных технических систем, математической основой которых являются методы решения основной задачи управления (ОЗУ).

Рассмотрим систему уравнений, описывающих поведение производственной системы, в виде

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, \omega, t), t \in [0, T], \\ x(0) &= x_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x(t) = (x_1, \dots, x_n)$  –  $n$ -мерный вектор фазовых координат. Начальные условия и управления  $\omega(t)$  в соответствии с системой (1) задают определенные фазовые траектории  $x_i = x_i(t)$ .

Пусть на множестве допустимых управлений и траекторий определены функционалы

$$I_\eta = I_\eta[x(t), \omega(t)], \quad \eta = \overline{1, \theta}, \quad (2)$$

каждый из которых представляет некоторый критерий качества (целевой критерий) управляемой системы.

Если проектируется совершенно новая система, которая должна обладать определенными свойствами, то технические условия записываются в виде

$$d_\eta \leq I_\eta \leq D_\eta, \quad \eta = 1, \theta, \quad (3)$$

где  $d_\eta, D_\eta$  задаются заранее в зависимости от расчетных режимов работы системы  $p \in \{1, 2, \dots, P\}$ , задающих и возмущающих входных воздействий  $f(t) \in \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$ , начальных условий.

**Постановка задачи.** Найти такой вектор допустимых управлений  $\omega$  из области в соответствии с технологическими и эксплуатационными требованиями (ТЭТ)  $c_j \leq \omega_j \leq C_j, j = 1, 2, \dots, m$ , при которых функционалы  $I_\eta[\omega]$ , характеризующие поведение системы, полученные в результате решения системы уравнений (1), удовлетворяют заданным техническим условиям (3) для всех расчетных режимов работы.

*Условие существования задачи.* Если задача проектирования имеет решение, то, вообще говоря, оно будет не единственным. В некорректно поставленных задачах проектирования решение вообще может не существовать. Поэтому необходимо установить условия существования решения ОЗУ и способы построения этого решения.

Для этого вместо функционалов (2) вводятся безразмерные функционалы

$$\gamma_\eta'[\omega] = \frac{D_\eta - I_\eta[\omega]}{D_\eta - d_\eta}, \quad \gamma_\eta''[\omega] = \frac{I_\eta[\omega] - d_\eta}{D_\eta - d_\eta}, \quad \eta = \overline{1, \theta}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что если  $d_\eta \leq I_\eta[\omega] \leq D_\eta, \eta = \overline{1, \theta}$ , то

$$0 \leq \gamma_\eta' \leq 1, \quad 0 \leq \gamma_\eta'' \leq 1, \quad \gamma_\eta'[\omega] + \gamma_\eta''[\omega] = 1. \quad (5)$$

Обратное утверждение также имеет место.

Введены обозначения

$$\gamma_\eta[\omega] = \gamma_\eta'[\omega], \quad \eta = \overline{1, \theta}, \quad \gamma_\eta[\omega] = \gamma_\eta''[\omega], \quad \eta = \overline{\theta + 1, 2\theta}.$$

Тогда неравенства (5) запишутся в виде

$$0 \leq \gamma_\eta[\omega] \leq 1, \quad \eta = \overline{1, 2\theta}. \quad (6)$$

Анализируя выражения (4), видим, что условие (6) можно заменить односторонними неравенствами

$$\gamma_{\eta}[\omega] \leq 1, \quad \eta = \overline{1, 2\theta} \quad (7)$$

либо

$$\gamma_{\eta}[\omega] \geq 0, \quad \eta = \overline{1, 2\theta}, \quad (8)$$

так как при выполнении (7) выполняется (8) и наоборот. В силу этого в дальнейшем будет рассматриваться условие (7) вместо (3). Показано, что для существования решения основной задачи управления необходимо и достаточно выполнения неравенства

$$\Gamma_0 = \min_{\omega} \max_{\eta} \gamma_{\eta}[\omega] \leq 1. \quad (9)$$

*Алгоритм численного решения задачи.*

1. Задается нулевое приближение вектора управлений  $\omega^0$  в соответствии с технологическими и эксплуатационными требованиями.

2. Решается система уравнений (1) с начальными условиями, и находится

$$x^0 = (x^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}).$$

3. Вычисляются значения  $\gamma_{\eta}^{(0)}$ ,  $\eta = \overline{1, 2\theta}$ , и находится  $\Gamma = \max_{\eta} \gamma_{\eta}^{(0)}$ .

4. Происходит обращение к алгоритму оптимизации, в результате чего выбирается первое приближение вектора управлений  $\omega^1$ .

5. Начиная с пункта 2 процесс повторяется и продолжается до тех пор, пока не будет найдено  $\Gamma_0 = \min_{\omega} \max_{\eta} \gamma_{\eta}[\omega] \leq 1$  или выполнено

условие прекращения поиска. Если  $\Gamma_0 \leq 1$ , то основная задача управления решена.

При решении основной задачи управления возникают случаи, когда поставленная задача решения не имеет, т. е.  $\Gamma_0 > 1$ . В работе реализован численный метод, позволяющий определить такой вариант технических условий или ТЭТ, при которых выполняется условие  $\Gamma_0 \leq 1$ . Основная идея этого метода заключается в том, что вводится новый вектор управления  $v_1 = \{c_j, C_j, d_{\eta}, D_{\eta}\}$ , а предложенный алгоритм является дальнейшим развитием основной задачи управления. Причем компоненты вектора  $v_1$  в свою очередь могут изменяться только в заранее заданных пределах внутри области допустимых значений, которые обозначены через  $V_1$ , т. е.

$$c_j' \leq c_j \leq c_j'', \quad C_j' \leq C_j \leq C_j'', \quad (10)$$

$$d_\eta' \leq d_\eta \leq d_\eta'', \quad D_\eta' \leq D_\eta \leq D_\eta''.$$

**Постановка задачи.** Определить такие управляющие параметры  $v_1$  из области (10), при которых выполняется условие

$$\Gamma_1[v_1] = \min_{v_1} \Gamma_0 = \min_{v_1} \min_{\omega} \max_{\eta} \gamma_\eta \leq 1. \quad (11)$$

Геометрическая интерпретация предлагаемого подхода представлена на рисунках 1 и 2, где  $\omega$  – область ТЭТ, которой соответствует область  $\Omega$  в пространстве целевых критериев. В этом же пространстве выделена область  $q$  заданных технических условий на управляемую систему. Этой области в пространстве управляющих параметров соответствует область  $Q$ . В том случае, когда  $\Gamma_0 > 1$ , область  $\omega$  не пересекается с областью  $Q$ , а область  $\Omega$  с  $q$ , т. е. отсутствует решение основной задачи управления.

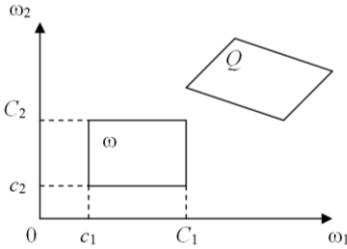


Рисунок 1 – Область управлений

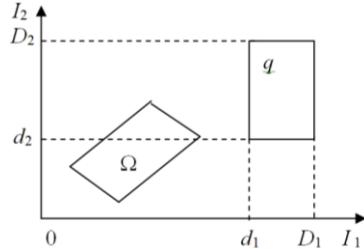


Рисунок 2 – Область целевых критериев

Таким образом, задача формирования рациональных технических условий и ТЭТ заключается в определении такого вектора управления  $v_1$ , при которых происходит пересечение областей  $\omega$  с  $Q$  и  $\Omega$  с  $q$ . Причем этот метод позволяет прогнозировать направление, в котором должны улучшаться ТЭТ для того, чтобы перспективные задачи проектирования и управления производственной системы имели решение.

#### Алгоритм решения

1. Для заданных технических условий, которые представляют первое приближение вектора управлений  $v_1^{(1)}$ , решается основная задача управления.

2. Проверяется условие  $\Gamma_0 \leq 1$ . Если оно выполняется, то решение основной задачи управления существует. Процесс вычислений на этом заканчивается. При необходимости решается оптимизационная задача.

3. Если  $\Gamma_0^{(1)} > 1$ , то в соответствии с алгоритмом случайного поиска определяется следующее приближение  $v_1^{(2)}$ . Начиная с п. 1 процесс повторяется в автоматическом режиме и продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие (11).

4. Проверяется условие окончания цикла. Если  $\Gamma_1^{(n)} > 1$ , то выдается сообщение проектировщику, который вновь задает компоненты вектора  $v_1$ .

Тогда задача проектирования и управления производственной системой решается в три этапа. На первом – решается ОЗУ. Если же условие (9) нарушается, т.е.  $\Gamma_0 > 1$ , то на втором этапе решается задача формирования рациональных технических условий и ТЭТ. На третьем этапе осуществляется выбор оптимальных управляющих параметров  $\omega$  системы.

Во второй главе «Подсистема управления производственным модулем (УПМ)» сформулированы основные требования к математическим моделям и приведены этапы моделирования. Разработан метод описания структуры системы управления производственным модулем, метод и соответствующий алгоритм автоматического формирования математической модели. Решены задачи моделирования и основная задача управления.

Математические модели производственного модуля включают модели системы управления металлорежущих станков и роботов с ЧПУ, привода робота-манипулятора и станка, а также транспортно-накопительной системы.

Структурная схема системы управления характеризуется определенными типами входящих в данную структуру элементов; типами математических моделей этих элементов; связями между элементами. С точки зрения способа получения, преобразования и передачи информации элементы подсистемы могут быть разделены на следующие типы:

- элемент  $F$  – генератор входного воздействия (единичная ступенчатая функция, управляющий момент, момент сопротивления, гармонический сигнал);

- функциональные элементы  $W_{i,j}$  – линейные (с запаздыванием, распределенными параметрами, импульсные), нелинейные – их математические модели в виде передаточных функций или уравнений;

- элемент  $\Phi$  – выходные характеристики (временные и частотные), которые определяют статические и динамические свойства системы управления объектом;

- элемент  $S$  – сумматор, который имеет выходной сигнал, равный алгебраической сумме входных сигналов;

- элемент  $C$  – разветвление. Имеет два выходных сигнала, каждый из которых равен сигналу, поступившему к точке разветвления.

**Постановка задачи.** Разработать способ описания и алгоритм автоматического формирования математических моделей широкого класса систем управления (одноконтурных и многоконтурных, многосвязных с перекрещивающимися связями), который позволит автоматизировать процесс получения математической модели.

*Алгоритм решения задачи*

1. На основе заданной структурной схемы и матрицы функциональных элементов  $W_{i,j}$  с использованием символов  $F, W, S, C, \Phi, \langle, \rangle, \langle \langle, \rangle \rangle$ , осуществляется просмотр структуры и описание ее по определенным правилам.

2. Выполняется трансляция описания структуры в формальную систему уравнений связи.

3. На основе полученных уравнений связи и матрицы функциональных элементов получается смешанная система дифференциальных и алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами вида

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= AY + BX + f, & \bar{A} &= \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \\ O &= CY + DX + e, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $Y$  –  $m$ -мерный вектор-столбец;  $X$  –  $k$ -мерный вектор-столбец;  $A, B, C, D$  – матрицы с постоянными элементами;  $f, e$  – векторы с постоянными компонентами.

4. Осуществляется преобразованием этой системы уравнений в форму, удобную для дальнейших исследований, для чего в уравнениях системы (12) освобождаются от переменной  $X$ . Но это возможно только в том случае, если матрица  $\bar{A}$  неособая.

Доказано это утверждение для двух случаев:  $|D| \neq 0$  и  $|D| = 0$ .

В результате преобразований система уравнений (12) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{Y}' &= A_1 Y' + f_1, \\ X &= A_2 Y' + f_2, \\ Y'' &= A_3 Y' + f_3, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $Y'$  – вектор, составленный из некоторых компонентов вектора  $Y$ , а  $Y''$  – образован из оставшихся компонентов вектора  $Y$ .

В работе решены задачи моделирования динамики станочной системы с различными типами приводов.

Для линейного электрогидравлического шагового привода решена основная задача управления. Компоненты вектора управления  $\omega = \{\kappa_1, T_1, \kappa_5, T_5, \kappa_6, \kappa_7\}$  выбираются из области, заданной в соответствии с ТЭТ:

$$\begin{aligned} c_{1p} \leq \kappa_1 \leq C_{1p}, \quad c_{2p} \leq T_1 \leq C_{2p}, \quad c_{3p} \leq \kappa_5 \leq C_{3p}, \\ c_{4p} \leq T_5 \leq C_{4p}, \quad c_{5p} \leq \kappa_6 \leq C_{5p}, \quad c_{6p} \leq \kappa_7 \leq C_{6p}. \end{aligned} \quad (14)$$

Технические условия заданы на показатели качества переходного процесса:

$$d_{1p} \leq t_{cp} \leq D_{1p}, \quad d_{2p} \leq t_p \leq D_{2p}, \quad \sigma \leq D_{3p}, \quad (15)$$

где  $t_{cp}$ ,  $t_p$  – соответственно время срабатывания и время регулирования;  $\sigma$  – величина перерегулирования.

**Постановка задачи.** Среди допустимых значений вектора управляющих параметров (14) найти такие, при которых результаты решения системы уравнений (13) при заданных расчетных случаях удовлетворяют техническим условиям (15).

*Алгоритм решения задачи*

1. Вводится описание структурной схемы (рис. 3) в виде

$F00; S(W30); W32; S(W22); W21; W41; W40; \Phi00;$

$CW41; W60; W22; CW40; W30; @,$

где  $F00$ ,  $\Phi00$  – ступенчатая и переходная функции соответственно;  $W32$ ,  $W21$ ,  $W41$ ,  $W40$ ,  $W60$ ,  $W22$ ,  $W30$  – передаточные функции элементов, хранящиеся в базе данных подсистемы управления производственным модулем.

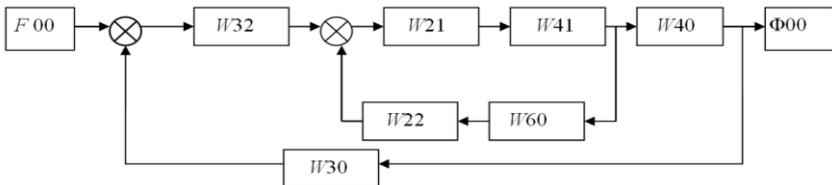


Рисунок 3 – Структурная схема

2. Вводятся постоянные параметры передаточных функций, ТЭТ и технические условия, параметры метода случайного поиска.

3. Задается нулевое приближение вектора управляющих воздействий:  $\omega^{(0)} = \{\kappa_1^{(0)}, T_1^{(0)}, \kappa_5^{(0)}, T_5^{(0)}, \kappa_6^{(0)}, \kappa_7^{(0)}\}$ .

4. По одному из критериев оценивается устойчивость системы. В случае неустойчивости осуществляется переход к п. 3, т.е. в соответствии с алгоритмом случайного поиска задается новое значение  $\omega^{(0)}$ ; в случае устойчивости – переход к п. 5.

5. Решается система уравнений (13) и строится переходной процесс.

6. Определяются показатели качества переходного процесса  $t_{cp}$ ,  $t_p$ ,  $\sigma$ , а затем вычисляются функционалы  $\gamma_\eta^{(0)}$ ,  $\eta = 1, 2, \dots, 6$  по формулам (4) и находится  $\Gamma = \max_\eta \gamma_\eta[\omega^{(0)}]$ .

7. Выбирается следующее приближение для вектора управления  $\omega^{(1)}$  в соответствии с алгоритмом случайного поиска. Начиная с п. 4 процесс повторяется и продолжается до тех пор, пока не будет найдено  $\Gamma_0 = \min_\omega \max_\eta \gamma_\eta[\omega] \leq 1$  или выполнено условие прекращения поиска  $BH < BK$ , где  $BH$  и  $BK$  – текущее и конечное значения масштаба поиска. Если  $\Gamma_0 \leq 1$ , то основная задача управления решена.

Результаты численного решения для вариантов, отличающихся техническими условиями, ТЭТ и параметрами метода случайного поиска приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Результаты решения основной задачи управления

	1	2	3	4	5	6	7	8
$\kappa_1^*$	20,0	27,0	29,0	36,0	42,0	22,0	19,0	19,0
$T_1^*$	0,1	0,14	0,08	0,27	0,32	0,13	0,16	0,22
$\kappa_5^*$	10,0	18,0	16,0	21,0	29,0	12,0	13,0	23,0
$T_5^*$	0,05	0,07	0,06	0,11	0,17	0,08	0,1	0,13
$\kappa_6^*$	0,5	0,38	0,73	1,2	1,6	0,72	1,1	1,4
$\kappa_7^*$	0,1	0,12	0,31	0,56	1,22	0,41	0,64	0,83
$\Gamma_0$	0,87	0,81	0,97	0,85	0,79	1,24	1,13	0,92

*Примечание.*  $\kappa_1^*$ ,  $T_1^*$ ,  $\kappa_5^*$ ,  $T_5^*$ ,  $\kappa_6^*$ ,  $\kappa_7^*$  – рациональные значения передаточных коэффициентов и постоянных времени, которые удовлетворяют ТЭТ.

Для первых пяти вариантов решена задача выбора рациональных параметров метода случайного поиска. В качестве критерия выбрано число удачных шагов, необходимых для выполнения условия  $\Gamma_0 \leq 1$ . В результате решения получены значения  $KK1 = 7$ ,  $KK2 = 5$ ,  $KK3 = 12$ , которые взяты за основу для остальных вариантов.

Предлагаемый подход позволяет решать и оптимизационные задачи по одному из выбранных критериев.

Для вариантов, где  $\Gamma_0 > 1$ , решены задачи формирования рациональных технических условий и ТЭТ в соответствии с алгоритмом, представленным в первой главе.

В третьей главе «Подсистема управления производственным участком (УПУ)» на основе программной реализации математических моделей и алгоритмов решены задача моделирования и основная задача управления для участка, включающего станки, транспортную систему и склад.

При решении задачи моделирования варьировались номенклатура деталей, размер партии деталей каждого типа, компоновка оборудования и параметры транспортной системы (ТС). В результате определяются загрузка основного оборудования, транспортной системы и общая производительность участка.

Математическая модель производственного участка включает взаимосвязанные модели технологической, складской и транспортной системы. Предполагается, что есть расписание функционирования участка, обеспечивающее в стационарном режиме производительность  $F$  изделий в единицу времени в соответствии с плановым заданием (вектор  $X$ ):

$$\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_k); \quad x_k \geq 0; \quad k = \overline{1, K}; \quad \sum_{k=1}^k x_k = 1.$$

Тогда математическая модель работы производственного участка имеет вид:

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^{S_k} \varphi_{sk} &= \gamma_k F, \quad k = \overline{1, K}; \quad \sum_{j \in I(i)} \varphi_{jisk} = \alpha_{ki} \cdot \varphi_{sk}, \quad i = \overline{1, I}; \quad j = \overline{1, J}; \quad k = \overline{1, K}; \quad s = \overline{1, S_k}; \\ \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S_k} \varphi_{jisk} &= \Psi_{ij}, \quad i = \overline{1, I}; \quad j = \overline{1, J}; \quad \varphi_{sk}, \quad \varphi_{jisk} \geq 0 \text{ для любых } j, i, s, k; \\ \sum_{i \in I(j)} w_{ij} \Psi_{ij} &\leq P_j, \quad j = \overline{1, J}; \quad \sum_{j \in I(i)} \Psi_{ij} = F \sum_{k=1}^K \alpha_{ki} \gamma_k, \quad i = \overline{1, I}, \quad F \geq 0, \quad \Psi_{ij} \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

для любых  $i, j, F \rightarrow \max$ ;

при ограничениях  $\varphi_k, \varphi_{sk}, \varphi_{isk}, \varphi_{jisk} \geq 0, \quad \varphi_k = \gamma_k F, \quad k = \overline{1, K}$

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^{S_k} \varphi_{sk} &= \varphi_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad \varphi_{isk} = \alpha_{ki} \cdot \varphi_{sk}, \quad i = \overline{1, I}, \quad k = \overline{1, K}, \quad s = \overline{1, S_k}; \\ P_{1j} &= \sum_{i \in I(j)} w_{ij} \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S_k} \varphi_{jisk}, \quad \Sigma q_{s,k} = 1, \quad q_{s,k} \geq 0, \end{aligned}$$

где  $K$  – число типов изделий;  $I$  – число различных операций, выполняемых над изделиями всех типов;  $\gamma_k, x_k$  – доля изделий  $k$ -го типа в общем объеме выпуска (плановом задании  $X$ );  $J$  – число рабочих позиций на участке;  $I_j$  – множество операций, выполняемых на  $j$ -й рабочей позиции;  $J_i$  – множество рабочих позиций, выполняющих  $i$ -ю операцию;  $P_j$  – коэффициент предельной загрузки  $j$ -й рабочей позиции;  $w_{ij}$  – время выполнения  $i$ -й операции на  $j$ -й рабочей позиции;  $F$  – интенсивность общего (входного/выходного) потока изделий, равная производительности;  $\varphi_k$  – интенсивность потока изделий  $k$ -го типа;  $\varphi_{sk}$  – интенсивность потока изделий  $k$ -го типа, обрабатываемых по  $s$ -й технологии;  $\varphi_{isk}$  – интенсивность потока требований на выполнение операции  $i$ , порождаемого потоком изделий  $k$ -го типа, которые обрабатываются по  $s$ -й технологии;  $\varphi_{jisk}$  – интенсивность потока требований на выполнение операции  $i$ , поступающего на  $j$ -ю рабочую позицию и порождаемого потоком изделий  $k$ -го типа, который обрабатывается по  $s$ -й технологии;  $P_{1j}$  – загрузка  $j$ -й рабочей позиции;  $\alpha_{ki}$  – коэффициент, характеризующий наличие  $i$ -й операции в  $k$ -м типе изделия;

$$\sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S_k} \varphi_{jisk} = \Psi_{ji} - \text{интенсивность потока требований на выполнение } i\text{-й операции, поступающего на } j\text{-ю рабочую позицию.}$$

Так как производительность производственной системы равна  $F$ , то каждая рабочая позиция успевает выполнять все требуемые операции и, следовательно, загрузка любой рабочей позиции не должна превосходить  $P_j$ , т.е.  $P_{1j} \leq P_j$ ;  $q_{sk}$  – доля изделий  $k$ -го типа, обрабатываемых по  $s$ -й технологии.

Вводятся интенсивности и потоки изделий между рабочими позициями и складом  $n_{j,i}$ ,  $nc_{j,i}$ ,  $ns_j$ ,  $nr_j$ ,  $ai_{j1,j2,i}$ ,  $ia_{j1,i}$ ; коэффициенты, характеризующие очередность выполнения операций  $\beta_{i,s,k}$ ,  $\beta_{1,i,s,k}$ ,  $\beta_{2,i1,i2,s,k}$ .

**Постановка задачи моделирования.** При заданных исходных данных, номенклатуре и размере партии деталей определить производительность участка, загрузку рабочих позиций и транспортной системы.

*Алгоритм решения задачи*

1. Рассчитываются значения  $P_{1j} = \sum w_{ij} \Psi_{ij}$ ,  $\varphi_{jisk} = \sum \sum \sum \sum \gamma_k \alpha_{ki} \Psi_{ij} / \gamma_k \alpha_{ki}$ .
2. Определяются интенсивности потоков  $n_{j,i} = \sum \sum \varphi_{jisk} \beta_{i,s,k}$ ,  
 $n_{j,i} = \sum \sum \varphi_{jisk} \beta_{1,i,s,k}$ .
3. Вычисляются значения  $ns_j = \sum nc_j$ ,  $nr_j = \sum n_{j,i}$ ,  $ia_{j1,i} = \sum \sum \sum \varphi_{jisk} \beta_{2,i1,i2,s,k}$ ,  
 $ai_{j1,j2,i} = \sum \sum \sum \sum ia_{j1,i} / ia_{j2,i}$ .

Интенсивности потоков  $ai_{j_1, j_2, i}$  для каждого  $I$  выбираются назначением (распределением) потоков, удовлетворяющих указанным ограничениям. Выходной величиной в этой части модели является матрица  $NA(OT, KU)$  потоков изделий между рабочими позициями, которая используется для расчета загрузки ТС.

4. Определяется загрузка транспортной системы. Исходными данными являются: матрица интенсивностей  $NA(J1, J2)$  потоков между различными позициями (рабочая позиция, склад); характеристики ТС (время погрузки и выгрузки изделия, скорость перемещения). На первом этапе вычисляется массив  $FJ(J1, J2)$  – доля изделий, поступающих от рабочей позиции  $j_1$  на рабочую позицию  $j_2$ , т.е.

$$FJ(J1, J2) = \sum_{j_1=1}^J \sum_{j_2=1}^J NA(J1, J2),$$

$$FJ(J1, J2) = 0, \text{ если } J1 = J2.$$

Затем рассчитываются полезная загрузка транспортной системы  $LP$  и холостая загрузка  $L_0$  по следующим формулам:

$$LP = \sum_{j_1=1}^J \sum_{j_2=1}^J NA(J1, J2)DT + \sum_{j_1=1}^J \sum_{j_2=1}^J NA(J1, J2)TI(J1, J2);$$

$$L_0 = \sum_{j_1=1}^J \sum_{j_2=1}^J FJ(J1, J2)DX + \sum_{j_1=1}^J \sum_{j_2=1}^J FJ(J1, J2)TI(J1, J2).$$

Тогда полная загрузка транспортной системы будет равна  $L = LP + L_0$ .

Таблица 2

**Время выполнения отдельных операций (в мин.)**

Типы деталей	Рабочие позиции (типы оборудования)			
	623ПМФ4	Ф260МФ3	ТПК-125	ТСМ-212
БГ8.034	2,4		3,2	2,8
БА6.185		2,3		6,4
ГС8.460.105		3,2	4,5	
БА8.483.107	4,2	1,3		5,1

На основе математической модели (16) и исходных данных, представленных в таблице 2, получены результаты моделирования (рис. 4, 5).



Рисунок 4 – Производительность, шт./ч



Рисунок 5 – Полезная нагрузка ТС, %

Производительность равная 75 шт./ч получилась для четырех вариантов. Анализируя максимальную полезную нагрузку ТС для этих вариантов, выбираем вариант 32, которому соответствуют детали типа 1, 2, 3.

Решена основная задача управления для производственного участка. При этом в качестве выходных параметров, характеризующих качество его функционирования, принята максимальная производительность  $F(k, x_k)$  и полезная нагрузка ТС  $L_p(k, x_k)$ , где  $k$  – типы деталей,  $x_k$  – размер партии каждого типа деталей. В соответствии с техническими условиями на проектирование к ним предъявляются определенные требования. Например, максимальная производительность производственного участка и полезная нагрузка ТС должны находиться в заданных пределах – в виде ограничений

$$d_{1p} \leq F \leq D_{1p}, \quad d_{2p} \leq L_p \leq D_{2p}, \quad (17)$$

где  $d_{1p}$ ,  $D_{1p}$ ,  $d_{2p}$ ,  $D_{2p}$  – заданные предельно допустимые значения переменных  $F$  и  $L_p$ .

Вектор управления  $\omega = (k, x_k)$  и область его допустимых значений  $D_\omega$  определяются неравенствами

$$c_{1p} \leq k \leq C_{1p}, \quad c_{2p} \leq x_k \leq C_{2p}, \quad (18)$$

**Постановка задачи.** Найти такой вектор управления  $\omega = (k, x_k)$  из допустимой области (18), при котором решение системы уравнений (16) удовлетворяет неравенствам (17). Технические условия заданы в виде  $54 \leq F \leq 80$ ;  $20 \leq L_p \leq 25$ . Типы деталей:  $c_{1p} - 1, 2$ ;  $C_{1p} - 1, 2, 3, 4$ . Размер партии:  $c_{2p} = 50$  шт.,  $C_{2p} = 200$  шт.

*Алгоритм решения задачи*

1. Задается нулевое приближение управляющих воздействий  $\omega^{(0)} = \{k^{(0)}, x_k^{(0)}\}$ .

2. Решается система уравнений (16), определяются максимальная производительность и полезная загрузка транспортного средства в соответствии с алгоритмом решения задачи моделирования.

3. Вычисляются функционалы  $\gamma_\eta^{(0)}$ ,  $\eta = 1, 2, \dots, 4$  по формулам (4) и находится  $\Gamma = \max_\eta \gamma_\eta[\omega^{(0)}]$ .

4. Выбирается следующее приближение для вектора управления  $\omega^{(1)}$  в соответствии с алгоритмом случайного поиска. Начиная с п. 2, процесс повторяется и продолжается до тех пор, пока не будет найдено  $\Gamma_0 = \min_\omega \max_\eta \gamma_\eta[\omega] \leq 1$ .

Результаты решения ОЗУ представлены на рисунках 6 и 7.

Таким образом, можно сформировать рациональное плановое задание для запуска в производство.

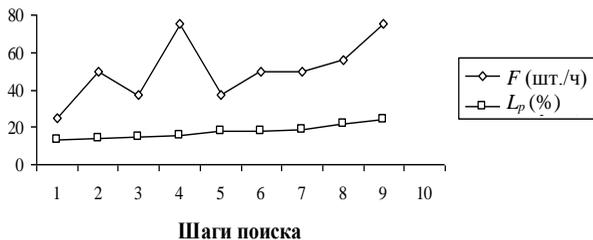
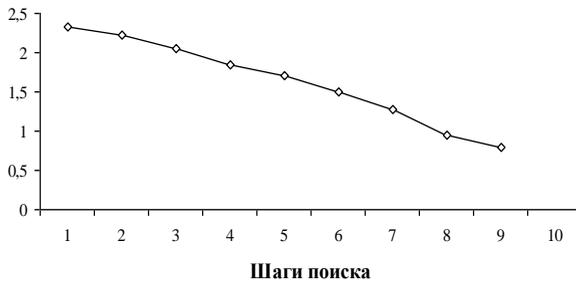


Рисунок 6 – Процессы изменения максимальной производительности (шт./ч) и полезной загрузки ТС (%)

Рисунок 7 – Процесс изменения величины  $\Gamma_0$ 

В четвертой главе «Методы и алгоритмы решения задач моделирования и основной задачи управления производственной системой» представлена математическая модель производственной системы, включающая модифицированные модели расчета времени изготовления изделий, количества и стоимости продукции, исходя из располагаемого оборудования и числа специалистов. Решена основная задача управления производственной системой, исследовано влияние параметров этой системы на ее характеристики. Представлены комплексная математическая модель производственной системы и ее программная реализация в виде интегрированной системы.

Необходимое количество станко-часов оборудования  $k$ -го вида для производства продукции  $p$ -го вида в количестве  $n_k^p$  штук равно производству  $F_k^p n_k^p$ .

Располагаемое количество станко-часов оборудования  $k$ -го вида, которое используется для производства продукции  $p$ -го вида в течение  $T_k^p$  часов, равно  $F_k T_k^p$ .

Из равенства между необходимым и располагаемым количествами станко-часов оборудования следует

$$T_k^p = n_k^p F_k^p / F_k. \quad (19)$$

Стоимость обработки  $n_k^p$  изделий будет составит

$$S_k^p = T_k^p \cdot S_k. \quad (20)$$

Полученное время  $T_k^p$  зависит от вида оборудования, т.е. от  $k$ . Оборудование, используемое в производстве продукции  $p$ -го вида, работает в соответствии с технологическим процессом изготовления (сетевым графиком) изделия. Разность  $\delta T_k^p = T_F^p - T_k^p$ ,  $k \in K^p$  представляет время простоя оборудования. Аналогично, время выпуска продукции с учетом располагаемых специалистов равно

$$T_m^p = n_m^p L_m^p / L_m. \quad (21)$$

Стоимость обработки  $n_m^p$  изделий будет составит

$$S_m^p = T_m^p \cdot S_m. \quad (22)$$

Разность  $\delta T_m^p = T_L^p - T_m^p$ ,  $m \in M^p$ , представляет время простоя специалистов. Зная величины  $T_F^p$  и  $T_L^p$  можно вычислить время  $T^p$  изготовления заданного количества  $n$  изделий  $p$ -го вида. Оно равно максимальному времени, затраченному на изготовление изделия в рассмотренных выше условиях, т.е. на располагаемом оборудовании с привлечением располагаемых специалистов предприятия  $T^p = \max\{T_F^p, T_L^p\}$ , т.е. выпуск продукции может сдерживаться или недостатком оборудования, или недостатком специалистов.

Потребное количество станко-часов оборудования  $k$ -го вида для производства продукции  $p$ -го вида в количестве  $n_k^p$  штук равно производству  $F_k^p n_k^p$ .

Располагаемое количество станко-часов оборудования  $k$ -го вида, которое используется для производства продукции  $p$ -го вида в течение заданного времени  $T^p$ , равно  $F_k T^p$ . Из равенства между потребным и располагаемым количеством станко-часов оборудования  $k$ -го вида находим

$$N_k^p = F_k T^p / F_k^p n_k^p, \quad (23)$$

где  $N_k^p$  – количество продукции  $p$ -го вида, которое можно изготовить за заданное время из условия работы всего располагаемого оборудования  $k$ -го вида.

Количество продукции  $p$ -го вида, которое можно изготовить за заданное время из условия располагаемых специалистов, равно

$$N_m^p = L_m T^p / L_m^p n_m^p. \quad (24)$$

Решение задачи моделирования требует ввода сетевого графика технологического процесса; необходимого количества станко-часов оборудования  $k$ -го вида для производства единицы продукции  $p$ -го вида  $F_k^p$ ; необходимого количества специалистов в человеко-часах  $m$ -го вида для выпуска единицы продукции  $p$ -го вида  $L_m^p$ ; стоимости работы оборудования  $S_k$ ; стоимости работы специалиста  $S_m$ ; располагаемого количества оборудования  $k$ -го вида  $F_k$ ; располагаемой численности специалистов  $m$ -го вида  $L_m$  ( $m \in M$ ); необходимого количества продукции  $p$ -го вида, которую требуется изготовить на оборудовании  $k$ -го вида  $n_k^p$ ; необходимого количества продукции  $p$ -го вида, которую требуется изготовить специалистами  $m$ -го вида  $n_m^p$ ; времени изготовления необходи-

мого количества продукции  $p$ -го вида на оборудовании  $k$ -го вида  $T_k^p$  и специалистами  $m$ -го вида  $T_m^p$  в количестве  $n$  штук.

Результатом моделирования являются величины  $T_F^p, \delta T_k^p, S_k^p, T_L^p, \delta T_m^p, S_m^p, N_k^p; N_m^p$ ; полное время работы в часах при изготовлении всей продукции  $T$ ; полная стоимость работы в рублях при изготовлении всей продукции  $S$ .

При решении задачи анализа возможностей предприятий с сетевым графиком производства эта сеть трансформируется в цепочку из  $N$  последовательно соединенных контейнеров. Каждый из этих контейнеров включают блоки, которые соединены или параллельно, или последовательно.

*Моделирование возможностей предприятия и решение ОЗУ осуществлялось для комплексно-автоматизированного металлообрабатывающего цеха, который выпускает мелкими сериями корпусные детали, тела вращения, мелкие детали, различные узлы и сборки.*

Рассмотрены последовательные и параллельные технологические процессы с числом оборудования и специалистов от 2 до 15 и деталей до 9.

При решении ОЗУ производственным процессом вводятся компоненты вектора управления  $\omega = \{S_k, F_k, S_m, L_m, n_k^p, T_k^p, n_m^p, T_m^p\}$ , которые выбираются из области, заданной в соответствии с ТЭТ:

$$\begin{aligned} c_{1k} \leq S_k \leq C_{1k}; \quad c_{2k} \leq F_k \leq C_{2k}; \quad c_{3m} \leq S_m \leq C_{3m}; \\ c_{4m} \leq L_m \leq C_{4m}; \quad c_{5k} \leq n_k^p \leq C_{5k}; \quad c_{6k} \leq T_k^p \leq C_{6k}; \\ c_{7m} \leq n_m^p \leq C_{7m}; \quad c_{8m} \leq T_m^p \leq C_{8m}, \end{aligned} \quad (25)$$

где  $c_{1k}, \dots, c_{8m}, C_{1k}, \dots, C_{8m}$  – заданные постоянные величины.

В качестве целевых критериев  $I[\omega]$  выбираются суммарная стоимость  $S$  изготовления всей партии деталей, время работы оборудования  $k$ -го вида  $T_F^p$  и специалистов  $m$ -го вида  $T_L^p$ , а также количество деталей каждого вида  $N_k^p$  и  $N_m^p$ , которые можно изготовить за заданное время. На них также наложены ограничения, которые представляют собой технические условия:

$$\begin{aligned} 0 \leq S[\omega] \leq D_1; \\ d_{2k} \leq T_F^p[\omega] \leq D_{2k}; \\ d_{3m} \leq T_L^p[\omega] \leq D_{3m}; \\ d_{4k} \leq N_k^p[\omega] \leq D_{4k}; \\ d_{5m} \leq N_m^p[\omega] \leq D_{5m}, \end{aligned} \quad (26)$$

где  $d_{2k}, d_{3m}, d_{4k}, d_{5m}, D_1, D_{2k}, D_{3m}, D_{4k}, D_{5m}$  – заданные предельно допустимые значения соответствующих переменных.

**Постановка задачи.** Среди допустимых значений вектора управляющих параметров (25) необходимо найти такие, при которых результаты решения ОЗУ удовлетворяют заданным техническим условиям (26).

*Алгоритм решения задачи*

1. Составляется технологический процесс, выделяются виды и типы оборудования, специалистов, деталей.

2. Задается время обработки  $F_k^p$  детали  $p$ -го вида на оборудовании  $k$ -го вида.

3. Задается время обработки  $L_m^p$  детали  $p$ -го вида специалистом  $m$ -го вида.

4. Задаются ТЭТ и технические условия.

5. Задаются параметры метода оптимизации.

6. Задается нулевое приближение вектора управлений

$$\omega^{(0)} = \{S_k^{(0)}, F_k^{(0)}, S_m^{(0)}, L_m^{(0)}, n_k^{p(0)}, T_k^{p(0)}, n_m^{p(0)}, T_m^{p(0)}\};$$

7. Решаются уравнения (20)-(25), определяются величины  $S, T_F^p, T_L^p, N_k^p, N_m^p$ .

8. Вычисляются функционалы  $\gamma_\eta^{(0)}$ ,  $\eta = 1, 2, \dots, 4$  по формулам (4) и находится  $\Gamma = \max_\eta \gamma_\eta[\omega^{(0)}]$ .

9. Выбирается следующее приближение для вектора управления  $\omega^{(1)}$  в соответствии с алгоритмом случайного поиска.

Начиная с п. 7, процесс повторяется и продолжается до тех пор, пока не будет найдено  $\Gamma_0 = \min_{\omega} \max_\eta \gamma_\eta[\omega] \leq 1$ . Если это условие вы-

полняется, то ОЗУ имеет решение и найденные значения компонентов вектора  $\omega^* = \{S_k^*, F_k^*, S_m^*, L_m^*, n_k^{p*}, T_k^{p*}, n_m^{p*}, T_m^{p*}\}$  являются рациональными.

При необходимости можно решить задачу оптимизации по одному из критериев. Если  $\Gamma_0 > 1$ , то ОЗУ решения не имеет. В этом случае необходимо изменять ТЭТ или технические условия. При этом на каждом шаге поиска выдаются значения варьируемых параметров (компоненты вектора управления); загруженности и простоя оборудования и специалистов; полного времени и стоимости выпуска всей партии деталей; возможного выпуска деталей каждого типа; текущего значения  $\Gamma_0^i$ . Окончательно выдаются рациональные параметры производственной системы (вектор управлений  $\omega^*$ ), значение  $\Gamma_0^*$ , а также число удачных и неудачных шагов поиска. Ограничивающими факторами в задачах рас-

чета времени изготовления изделий и количества продукции являются имеющиеся на предприятии оборудование  $F_k$  и специалисты  $L_m$ .

В работе решена основная задача управления для технологического процесса, состоящего из пяти деталей (рис. 8).

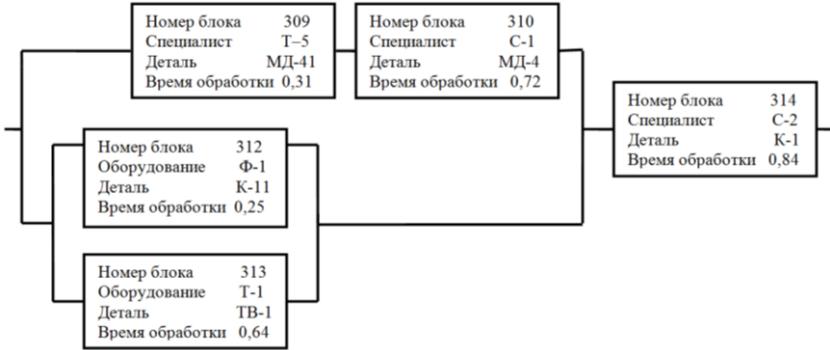


Рисунок 8 – Технологический процесс

Вектор управления включает две компоненты  $\omega = \{F_2, n_3^5\}$ , которые выбираются из области  $\omega$  ( $1 \leq F_2 \leq 5$ ;  $1 \leq n_3^5 \leq 10$ ) (рис. 9), а технические условия заданы в виде области  $q$  ( $0,5 \leq T_{F_2} \leq 1,1$ ;  $5 \leq N_3^5 \leq 12$ ) (рис. 10).

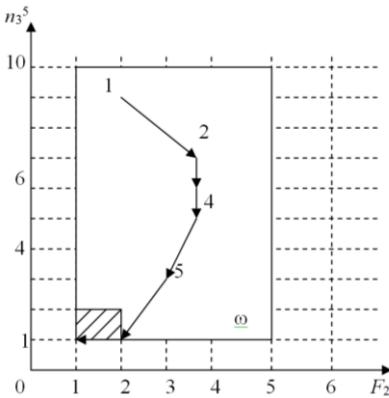


Рисунок 9 – Область поиска

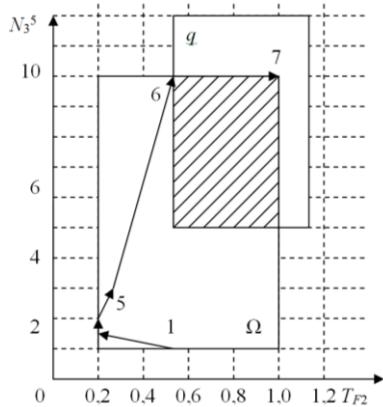


Рисунок 10 – Область целевых критериев

Заштрихованная область на рисунке 9 соответствует области решения ОЗУ, в каждой точке которой удовлетворяются заданные технические условия.

Графики изменения компонентов вектора управления, целевых критериев и величины  $\Gamma_0$  представлены на рисунках 11-13, где  $F_2$  – располагаемое количество фрезерных станков типа Ф-1;  $n_3^5$  – количество корпусных деталей типа К-1;  $T_{F2}$  – время в часах, необходимое для изготовления деталей типа К-11;  $N_3^5$  – количество корпусных деталей типа К-1, которое можно изготовить за заданное время.

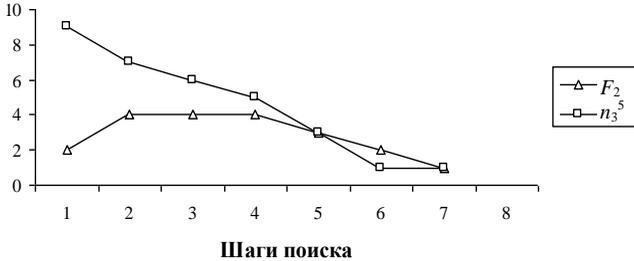


Рисунок 11 – Процессы изменения компонентов вектора управления

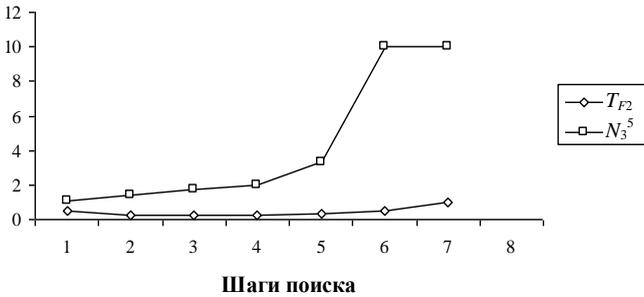


Рисунок 12 – Процессы изменения целевых критериев

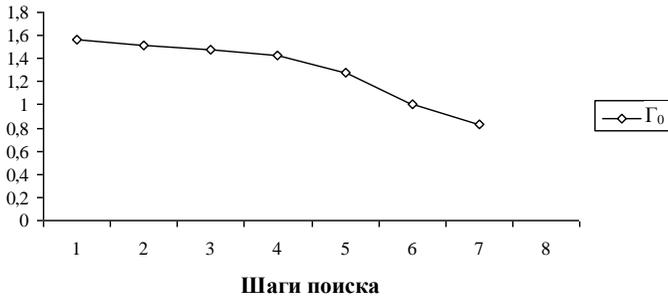


Рисунок 13 – Процесс изменения величины  $\Gamma_0$

Также решены задачи для:

1) технологического процесса, состоящего из шести деталей. Компоненты вектора управления  $\omega = \{F_2, L_3, n_2^2, n_3^6\}$  выбираются из области, заданной в соответствии с ТЭТ:  $2 \leq F_2 \leq 6$ ;  $2 \leq L_3 \leq 6$ ;  $2 \leq n_2^2 \leq 6$ ;  $2 \leq n_3^6 \leq 6$ .

Критерии качества (целевые критерии)  $I(\omega) = \{T_{F_2}, T_{L_3}, N_2^2, N_3^6\}$ . Технические условия заданы в виде  $1 \leq T_{F_2} \leq 5$ ;  $1 \leq T_{L_3} \leq 5$ ;  $2 \leq N_2^2 \leq 6$ ;  $2 \leq N_3^6 \leq 6$ . Рассмотрены три варианта, отличающиеся параметрами метода оптимизации. Результаты решения задачи представлены на рисунках 14-16;

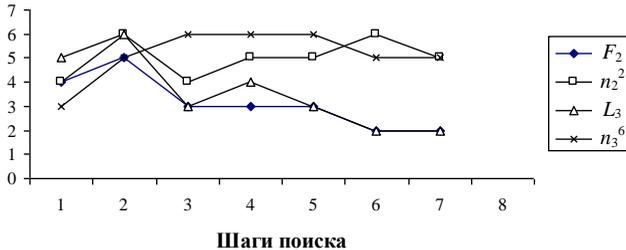


Рисунок 14 – Процесс изменения компонентов вектора управления

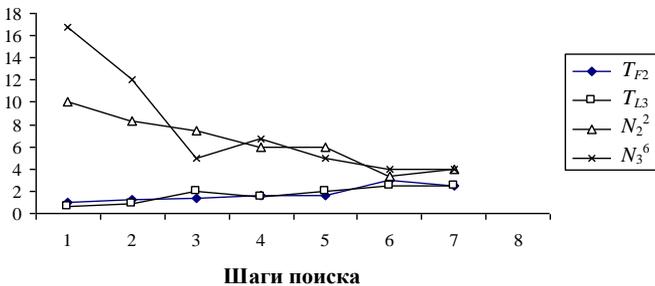


Рисунок 15 – Процесс изменения критериев качества

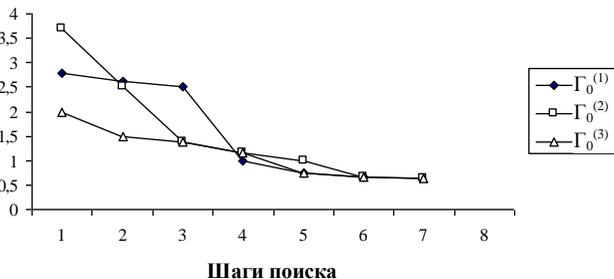


Рисунок 16 – Процесс изменения величины  $\Gamma_0$

2) технологического процесса, состоящего из шести деталей. Компоненты вектора управления  $\omega = \{F_1, F_2, L_1, n_2^2, n_2^4, n_1^3\}$ , целевые критерии  $I(\omega) = \{T_{F1}, T_{F2}, T_{L1}, N_2^2, N_2^4, N_1^3\}$ ;

3) технологического процесса изготовления узла, состоящего из пяти деталей. Компоненты вектора управления  $\omega = \{F_1, F_2, L_1, F_3, F_4, F_5, F_6, L_2, L_3, n_1^1, n_2^2, n_1^3, n_3^4, n_4^5, n_5^6, n_6^7, n_2^8, n_3^9\}$ , целевые критерии  $I(\omega) = \{T_{F1}, T_{F2}, T_{L1}, T_{F3}, T_{F4}, T_{F5}, T_{F6}, T_{L2}, T_{L3}, N_2^2, N_1^3, N_3^4, N_4^5, N_5^6, N_6^7, N_2^8, N_3^9\}$ .

Для рассмотренных выше задач получены рациональные значения количества оборудования, специалистов и деталей каждого вида, суммарное время и суммарная стоимость выпуска всей партии деталей. Установлено влияние количества оборудования и численности специалистов на характеристики производственной системы. Выработаны рекомендации по структурной перестройке производства.

При построении комплексной математической модели реализован новый подход к построению структуры сложной иерархической многоуровневой производственной системы, в основе которого заложена идея взаимной связи между уровнями, т.е. подсистемы имеют связи друг с другом через свои входы и выходы. Управляющие функции и параметры подсистемы верхнего уровня назначаются критериями качества для подсистем следующего нижнего уровня, а управляющие параметры целевой подсистемы данного уровня назначаются критериями качества для подсистем следующего нижнего уровня и т.д. Так, управляющие параметры подсистемы УПС  $\omega^1 = \{S_k, F_k, S_m, L_m, n_k^p, T_k^p, n_m^p, T_m^p\}$ , целевой подсистемы данного уровня назначаются критериями качества для подсистем следующего нижнего уровня, т.е.  $I^2[\omega^2] = \omega^1 = \{n_k^p, n_m^p\}$ . Это производительность участка  $F$  для подсистемы УПУ. А рабочие позиции подсистемы УПУ с характеристиками переходного процесса системы управления ( $t_{cp}$ ,  $t_p$ ,  $\sigma$ ) различных типов приводов становятся целевыми критериями подсистемы УПМ. В качестве проектных параметров в этой подсистеме выбраны компоненты вектора управления  $\omega^2 = \{k_1, T_1, k_5, T_5, k_6, k_7\}$ .

Приведена структура интегрированной системы, состоящая из подсистем управления производственной системой – УПС, участком – УПУ и производственным модулем – УПМ.

Подсистема УПС состоит из двух модулей – моделирования и решения ОЗУ. Каждая из них использует базу данных MySQL с существующей структурой по видам и типам оборудования, специалистов и деталей. В подсистеме реализованы алгоритмы расчета времени изготовления продукции, стоимости и количества продукции. Подсистема

решения ОЗУ содержит блоки оптимизации и вычисления критерия качества. Система разработана на языках PHP, Ajax, SQL, представляет собой Web-приложение и выполняется в Интернет-обозревателе. Это дает преимущества развертывания системы в любой современной операционной системе.

Система выполняет следующие функции:

- добавление и редактирование информации. Причем добавление информации осуществляется путем ввода простого текста в web-форму, состоящую из полей, соответствующих типовым элементам страниц, и путем выбора имеющейся информации, хранящейся в базе данных;

- обеспечение навигации по всем доступным пользователю ресурсам и отображение соответствующей информации.

На главной странице каждого раздела системы размещены ссылки на все разделы и подразделы и основные навигационные элементы.

Таким образом, разработанная интегрированная система позволяет решать задачи моделирования и основную задачу управления как отдельных подсистем производственной системы, так и оценить принципиальную возможность выпуска заданной продукции, рассчитать ее параметры, исходя из заданных технологических и эксплуатационных требований и технических условий.

### **Основные результаты**

1. Разработан алгоритм и численный метод автоматического формирования рациональных технических условий, технологических и эксплуатационных требований (ТЭТ), который является дальнейшим развитием основной задачи управления. Метод позволяет прогнозировать направление, в котором должны улучшаться ТЭТ, для того чтобы перспективные задачи проектирования и управления производственной системой имели решение.

2. Предложен новый способ описания структуры системы управления модулем (станком, роботом), отличающийся от известных простотой в освоении и универсальностью (применим для широкого класса систем управления – линейных (с запаздыванием, распределенными параметрами, импульсных), нелинейных, одноконтурных и многоконтурных, многосвязных с перекрещивающимися связями), основная идея которого состоит в том, что по заданной структурной схеме и матрице функциональных элементов системы с использованием терминов теории автоматического управления осуществляются просмотр структуры и описание ее по определенным правилам.

3. На основе полученного описания структуры разработаны метод и соответствующий алгоритм автоматического формирования матема-

тической модели в виде системы уравнений или результирующей передаточной функции, которые позволяют на основе методов теории управления проводить дальнейшие исследования на устойчивость, качество и т.д., а также решать задачу моделирования и основную задачу управления.

4. Сформулирована постановка задачи и решены задачи моделирования для нескольких вариантов систем управления станка с ЧПУ и робота-манипулятора. После задания ограничений типа неравенств на управляемые переменные и критерии качества решена основная задача управления. Приведен алгоритм решения оптимизационной задачи.

5. Представлена модифицированная математическая модель производственного участка, который состоит из обрабатывающих модулей, транспортной системы и склада. Разработан программный комплекс управления производственным участком (УПУ), с помощью которого для различной номенклатуры и размеров партии деталей решены задачи моделирования и основная задача управления. Даны рекомендации по выбору параметров рабочего участка и плановому заданию исходя из производительности, загрузки технологического оборудования и транспортного средства.

6. Модифицированы методы решения основной задачи управления производственной системой и алгоритмы оценки возможностей системы производить и выпускать заданную продукцию в необходимом количестве в единицу времени. При этом находится не одно глобально-оптимальное решение, а определяется область допустимых решений, для которых выполняются заданные технические условия на целевые критерии, представленные в виде системы неравенств.

7. Разработан программный комплекс управления производственной системой (УПС), состоящий из двух подсистем для решения задач моделирования и основной задачи управления. Каждая из этих подсистем использует базу данных MySQL с существующей структурой по видам и типам оборудования, специалистов и деталей.

8. Проведены комплексные исследования задач моделирования и основной задачи управления для различных по сложности технологических процессов, числа варьируемых параметров (компонентов вектора управлений – 2, 4, 6, 18, 27) и целевых критериев (2, 4, 6, 12, 18). Выработаны рекомендации по выбору параметров и характеристик производственной системы, совершенствованию производства и управлению производственным процессом.

9. Реализован новый подход к построению структуры сложной иерархической многоуровневой системы, который позволяет получить

комплексную математическую модель производственной системы, входящую в состав интегрированной системы. Представлена структура такой системы, включающая подсистемы управления производственным модулем, участком и производственной системой (цехом).

10. Таким образом, данная работа посвящена построению математических моделей, разработке новых методов и средств автоматизации технологической подготовки производства на основе идей основной задачи управления.

11. Дальнейшее развитие работ по теме диссертации связано с разработкой математических моделей уровня производственного предприятия, с использованием разработанного программного комплекса для исследования других более сложных технических и экономических систем.

Основные положения диссертации отражены в двух монографиях, 48 научных работах, 12 из которых опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК России, а также в 4 учебных пособиях. Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Монографии**

1. Иванов, В.К. Автоматизация проектирования и управления гибкими производственными системами и процессами в машиностроении / В.К. Иванов, Т.К. Сиразетдинов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. – 228 с.
2. Иванов, В.К. Моделирование и автоматизация проектирования ГПС машиностроения / В.К. Иванов. – Saarbrucken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 249 с.

### **Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах из списка ВАК России**

3. Иванов, В.К. Об аналитическом проектировании автомата продольного управления самолетом / В.К. Иванов, Т.К. Сиразетдинов // Известия вузов. Авиационная техника. – 1977. – № 4. – С. 73-78.
4. Иванов, В.К. Автоматизация проектирования и управления возможностями предприятия / В.К. Иванов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – М., 2009. – Т. 16, вып. 5. – С. 853-854.
5. Иванов, В.К. К задаче аналитического проектирования элементов гибких производственных систем / В.К. Иванов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2010. – № 1. – С. 93-96.

6. Иванов, В.К. Язык описания структурных схем систем управления станков и роботов с ЧПУ / В.К. Иванов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – М., 2010. – Т. 17, вып. 3. – С. 412-413.

7. Иванов, В.К. Автоматизация выбора рациональных параметров производственной системы / В.К. Иванов // Автоматизация и современные технологии. – 2010. – № 9. – С. 26-29.

8. Иванов, В.К. К задаче моделирования и аналитического проектирования производственного участка / В.К. Иванов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – М., 2010. – Т. 17, вып. 3. – С. 411-412.

9. Иванов, В.К. Автоматизация моделирования возможностей гибких производственных систем / В.К. Иванов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2010. – № 4. – С. 142-144.

10. Иванов, В.К. Интегрированная система моделирования и управления экономическими объектами / В.К. Иванов // Вестник Марийского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 26-32.

11. Иванов, В.К. Моделирование и автоматизация проектирования подсистем гибких производственных систем / В.К. Иванов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – М., 2010. – Т. 17, вып. 6. – С. 889-890.

12. Иванов, В.К. Автоматизация моделирования и управления возможностями производственной системы / В.К. Иванов // Автоматизация и современные технологии. – 2011. – № 4. – С. 24-28.

13. Иванов, В.К. К задаче управления возможностями гибкой производственной системы / В.К. Иванов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2011. – № 3. – С. 96-99.

14. Иванов, В.К. Интегрированная система моделирования и управления возможностями предприятия / В.К. Иванов // Автоматизация и современные технологии. – 2012. – № 7. – С. 34-39.

### **Научные статьи и материалы научно-технических конференций**

15. Иванов, В.К. Формирование математической модели САУ / В.К. Иванов, В.С. Трахтенберг // Оптимизация процессов в авиационной технике. – Казань, 1978. – Вып. 2. – С. 69-74.

16. Случайный поиск в системах оптимального проектирования / В.С. Трахтенберг, В.К. Иванов, Ю.Н. Новоселов [и др.] // Вопросы кибернетики. Проблемы случайного поиска. – М.: Научный совет по комплексной программе «Кибернетика» АН СССР, 1978. – Вып. 33. – С. 107-111.

17. Иванов, В.К. Об автоматическом поиске оптимальных технических условий / В.К. Иванов // Оптимизация процессов в авиационной технике. – Казань, 1980. – Вып. 3. – С. 67-70.

18. Иванов, В.К. Вопросы синтеза рациональных параметров интегрированных производственных систем / В.К. Иванов // Пути и меры по реализации программ внедрения ПР, разработки РТК и участков на предприятиях машиностроения: научно-техническая конференция. – Уфа, 1984. – С. 14-15.

19. Иванов, В.К. Метод автоматизированного синтеза управлений ГПС / В.К. Иванов // Пятая Всесоюзная конференция по оптимальному управлению в механических системах. – Казань, 1985. – С. 138-139.

20. Иванов, В.К. Имитационное моделирование и автоматизация синтеза ГПС / В.К. Иванов // Разработка и внедрение РТК и ГПС: республ. науч.-практ. конф.: тез. докл. – Йошкар-Ола, 1987. – С. 63-65.

21. Иванов, В.К. Автоматизация проектирования гибких производственных систем / В.К. Иванов // IV Всесоюз. совещ. по робототехническим системам: тез. докл. – Киев, 1987. – С. 177-178.

22. Иванов, В.К. Современные проблемы автоматизации проектирования ГПС / В.К. Иванов // Диалог наук на рубеже XX-XXI веков и проблемы современного общественного развития: мат-лы пост. действ. всерос. междисц. науч. конф. Ч. 2. – Йошкар-Ола, 1997. – С. 82.

23. Иванов, В.К. Автоматизация моделирования возможностей предприятия / В.К. Иванов // Инновационные разработки вузовской науки – российской экономике: всерос. науч.-практ. конф.: сб. статей. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. – С. 65-71.

24. Иванов, В.К. Математическое моделирование и автоматизация проектирования ГПС машиностроения / В.К. Иванов // Исследования. Технологии. Инновации: всерос. науч.-техн. конф. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – С. 110-113.

25. Иванов, В.К. Автоматизированная система анализа и синтеза параметров и характеристик производственной системы / В.К. Иванов // DNY VEDY. – Praha, 2012. – С. 36-39.

26. Иванов, В.К. К задаче аналитического проектирования производственной системы / В.К. Иванов // Moderní vymoženosti vědy. – Praha, 2013. – С. 79-83.

27. Иванов, В.К. К решению основной задачи управления технологической подготовкой производства / В.К. Иванов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 2. – С. 81-86.

**Свидетельства о государственной регистрации программ ЭВМ**

28. Свидетельство № 2012618806. Автоматизированная система моделирования работы производственного участка машиностроительного предприятия / В.К. Иванов. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.09.2012 г.

29. Свидетельство № 2013611283. Автоматизированная система моделирования и оптимизации параметров производства / В.К. Иванов, И.В. Рудометов. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9.01.2013 г.