

На правах рукописи



**Учайкин Роман Александрович**

**МЕТОДИКА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ  
УПРАВЛЕНИИ КОМПЛЕКСОМ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНИКИ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА  
ОСНОВЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 2.3.1 - Системный анализ, управление и обработка  
информации

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2022

Работа выполнена на кафедре «Вычислительная техника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный технический университет"

Научный руководитель: **Орлов Сергей Павлович**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Долинина Ольга Николаевна,**  
доктор технических наук, профессор, проректор по цифровой трансформации ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина», г. Саратов.

**Зинкин Сергей Александрович,**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов.

Защита диссертации состоится 20 апреля 2022 г. в 12-30 на заседании диссертационного совета 24.2.377.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Первомайская, д. 18 и на сайте диссертационного совета 24.2.377.02 <http://d21221703.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02; тел. (846) 337-04-43, e-mail: zoteev-ve@mail.ru.

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.377.02  
доктор технических наук, доцент

 .Е. Зотеев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Информатизация и цифровизация приводят к использованию вычислительной техники на всех стадиях жизненного цикла производства сложных изделий на научно-производственных предприятиях авиационной и ракетно-космической промышленности. Под средством вычислительной техники (СВТ) понимается стационарная единица компьютерного оборудования, применяемая в автоматизированных системах управления различного назначения всех уровней, которая обеспечивает решение проектных, технологических и управленческих задач на предприятии. К таким средствам относятся как отдельные компьютеры, так и многомашинные вычислительные комплексы. Комплекс средств вычислительной техники (КСВТ) - это совокупность всех единиц вычислительного оборудования на предприятии. Научно-производственное предприятие (НПП) — организация, проводящая научные исследования и проектные разработки сложных изделий наряду с их освоением в производстве и выпуском продукции.

Задача оптимального использования КСВТ на научно-производственных предприятиях является одной из важнейших в современных информационных технологиях. Это связано с тем, что закупка, эксплуатация, техническое обслуживание и модернизация имеющейся на предприятии вычислительной техники требуют значительных финансовых затрат. Широкая номенклатура средств вычислительной техники, высокая стоимость и особая роль КСВТ в функционировании научно-производственного предприятия ставят ряд новых задач управления. Таким образом, актуальным является разработка методов, моделей и алгоритмов принятия решений при управлении СВТ предприятий.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Теоретическую основу выполненных в диссертации исследований составили основополагающие труды по теории сложных систем и системному анализу таких ученых, как В.Н. Бурков, В.Л. Бурковский, С.Н. Васильев, М.В. Губко, А.А. Емельянов, В.В. Кульба, В.В. Липаев, Н.Н. Моисеев, Д.А. Новиков, Г.С. Поспелов, И.В. Прангишвили, А.Д. Цвиркун, В.Д. Шапиро, Э.А. Трахтенгерц, и зарубежных исследователей А. Charnes, W.W. Cooper, К. Jensen, К. Heldman, Н. Kerzner, L. Kristensen, Y. Shoham, К. Leyton-Brown, М. Mesarovic, Y. Takahara, E. Rhodes.

Решением задач оптимального использования ресурсов вычислительной техники занимаются научные коллективы Тамбовского государственного технического университета (Ю.Ю. Громов, В.В. Алексеев, В.Е. Дидрих, И.В. Дидрих, Ю.В. Минин); Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (В.В. Борщ, А.В. Лазаренко). Задачи управления крупномасштабными информационными системами с переменной структурой решались в Институте проблем управления РАН РФ (А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев, В.В. Кульба).

В Массачусетском Технологическом Институте (MIT), США, исследуется взаимодействие центральных и периферийных компонентов в сетевой

структуре и разрабатываются методы построения оптимальной структуры связи (M. Mosleh, P. Ludlow, B. Heydari).

Несмотря на значительные достижения в области распределения и использования вычислительной техники в подразделениях предприятия остается ряд нерешенных проблем, вызванных следующими факторами.

1. Автоматизация производственных процессов и внедрение информационных технологий приводит к увеличению количества используемых вычислительных средств, усложнению организации вычислительных сетей. На крупных предприятиях число единиц компьютерного оборудования достигает десятков тысяч и продолжает расти.

2. Недостаточно развит системный подход к управлению комплексом СВТ, который должен учитывать как финансовый аспект закупки оборудования, так и временные графики выполнения производственных задач, и процессы технического обслуживания и ремонта СВТ.

3. Отсутствуют системы поддержки принятия решений при назначении СВТ в подразделения предприятия и анализе режимов эксплуатации.

В связи с этим актуальной является задача создания методологической основы для разработки системы поддержки принятия решений по управлению распределением и обслуживанием средств вычислительной техники на научно-производственных предприятиях.

**Целью диссертационной работы** является уменьшение капитальных и эксплуатационных затрат на средства вычислительной техники и снижение задержек выполнения производственных задач на основе системных моделей и методики поддержки принятия решений при управлении распределением и использованием компьютерного оборудования в подразделениях научно-производственного предприятия.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены **следующие основные задачи:**

1) проведение системный анализ функционирования комплекса средств вычислительной техники научно-производственного предприятия с разнородными подразделениями и большим количеством компьютерного оборудования.

2) разработка методики поддержки принятия решений при управлении приобретением, распределением и режимами эксплуатации средств вычислительной техники в зависимости от специфики выполняемых производственных задач.

3) постановка и решение системной оптимизационной модели назначения вычислительной техники на производственные задачи с учетом различных ограничений, вызванных спецификой предприятия.

4) разработка и исследование системной имитационной модели для оперативной проверки графиков выполнения производственных задач при использовании назначенных средств вычислительной техники.

5) разработка алгоритма оценки принятых решений по распределению средств вычислительной техники с учетом планируемых сроков и показателей производственных задач.

б) проведение экспериментальных исследований предложенной методики и системных моделей и выработка рекомендаций по повышению эффективности функционирования средств вычислительной техники на предприятии АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара.

### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Разработана методика поддержки принятия решений при управлении средствами вычислительной техники на научно-производственном предприятии, *отличающаяся* использованием комплекса гетерогенных системных моделей, построенных на основе оптимизационно-имитационного подхода и учитывающих этапы жизненного цикла и специфику производства продукции, что обеспечивает выбор на ранних этапах планирования оптимального варианта закупки компьютерного оборудования, перераспределения вычислительной техники между подразделениями и организации ее технического обслуживания.

2. Сформулирована и решена задача назначения средств вычислительной техники в подразделения предприятия на основе целочисленного линейного программирования с булевыми переменными, *отличающаяся* учетом ограничений на количество типов и конфигураций компьютеров и допустимыми значениями их характеристик в зависимости от назначенных задач, что позволяет получить оптимальное по критерию финансовых затрат распределение компьютерного оборудования при соблюдении сроков производственных процессов.

3. Разработана новая системная имитационная модель для верификации решения задачи оптимального назначения средств вычислительной техники, *отличающаяся* использованием стохастических временных раскрашенных сетей Петри и построением иерархической структуры модельных модулей, соответствующих наиболее критичным процессам выполнения производственных задач, что обеспечивает выполнение заданий в срок и сокращение простоев из-за технического обслуживания и ремонта компьютерного оборудования.

4. Разработан алгоритм сравнительной оценки использования средств вычислительной техники предприятия, основанный на методе Data Envelopment Analysis (DEA), *отличающийся* использованием индекса Малмквиста и моделей Чарнеса-Купера-Роуда (CCR) и Банкера-Чарнеса-Купера (BCC) для подразделений предприятия, которые учитывают как основные параметры компьютерного оборудования, так и ключевые производственные показатели подразделений для сравнения различных сценариев распределения средств вычислительной техники, что позволяет снизить затраты на их приобретение и эксплуатацию.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту.**

1. Методика поддержки принятия решений при управлении средствами вычислительной техники на научно-производственном предприятии на базе разработанного комплекса гетерогенных системных моделей, построенных на основе оптимизационно-имитационного подхода и учитывающих этапы жизненного цикла и специфику производства.

2. Задача назначения средств вычислительной техники в подразделения предприятия на основе целочисленного линейного программирования с булевыми переменными, отличающаяся учетом ограничений на ресурсы и параметры компьютерного оборудования.

3. Системная имитационная модель для верификации решения задачи оптимального назначения средств вычислительной техники, отличающаяся использованием стохастических временных раскрашенных сетей Петри и построением иерархической структуры модельных модулей, соответствующих наиболее критичным процессам выполнения производственных задач.

4. Алгоритм сравнительной оценки эффективности использования средств вычислительной техники в подразделениях предприятия, основанный на методе Data Envelopment Analysis и использовании системных ССР и ВСС моделей подразделений и индекса Малмквиста.

**Теоретическая и практическая значимость.** Значимость теоретических результатов работы заключается в том, что предложенные системные модели позволяют формализовать процессы распределения и эксплуатации комплекса средств вычислительной техники на предприятии, принять научно-обоснованные и оперативные решения.

Практическая значимость исследований заключается в применении на крупных научно-производственных предприятиях машиностроительной отрасли для определения оптимальных с точки зрения экономической эффективности вариантов использования компьютерного оборудования, рассматриваемых в связи с особенностями проектных, конструкторских, технологических процессов.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа и математического программирования, методы математического анализа, имитационное моделирование.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов исследования** обеспечиваются корректным использованием теории математического программирования, методов имитационного моделирования, согласованностью численных экспериментов на системных моделях с практическим использованием методики на предприятии, обсуждением выводов проведенных исследований на научных конференциях.

Обоснованность полученных в работе научных результатов и выводов подтверждается анализом технико-экономического эффекта их использования на предприятии АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара.

**Реализация результатов исследований.** Диссертационная работа выполнялась в рамках проекта по гранту РФФИ «Аспиранты» № 20-37-90014 в 2020 -2022 годах. Результаты диссертационной работы в виде методики и системных моделей использованы при распределении средств вычислительной техники в производственной деятельности предприятия АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара.

Результаты диссертации в виде имитационных моделей использованы в проекте № 075-02-2018-225 «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с

автономным и дистанционным режимом управления», уникальный ID номер RFMEFI157718X0286, выполненному в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Результаты диссертации в виде моделей и алгоритмов внедрены в учебный процесс Самарского государственного технического университета при подготовке студентов по направлениям 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 09.03.04 «Программная инженерия».

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: 32-й и 34-й Международных научных конференциях "Математические методы в технике и технологиях", (г. Саратов, 2019г., г. Санкт-Петербург, 2021 г.); II Международной конференции «MIP: ENGINEERING' 2020», (г. Красноярск, 2020г.); Международной научно-технической конференции "Перспективные информационные технологии, ПИТ-2020", (г. Самара, 2020г.); II Международной конференции «APITECH-II - 2020: Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг», (г. Красноярск, 2020 г.); VII Всероссийской конференции «Пром-Инжиниринг 2021» и международной конференции «ICIEAM- 2021», (г. Сочи, 2021г.); X Всероссийской конференции "Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии", (г. Оренбург, 2021г.), IV Международной конференции «MIST: Aerospace-IV 2021: Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации», (г. Красноярск, 2021).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 14 работ, из них: 4 публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 4 работы в изданиях, индексирующихся в Scopus и Web of Science, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Все результаты, определяющие научную новизну, получены автором лично. В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: разработка системных моделей [5, 6], решение задачи оптимального распределения СВТ [1, 10], разработка и исследование имитационных моделей на сетях Петри [4, 7, 8, 13], анализ решений задачи оценки использования СВТ [2].

**Структура диссертации.** Диссертация изложена на 158 страницах, состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы из 151 наименования, содержит 43 рисунка, 20 таблиц и 2 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи исследования, характеризуется научная новизна полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** выполнен системный анализ процессов управления комплексом средств вычислительной техники научно-производственного предприятия с разнородными подразделениями и большим количеством компьютерного оборудования. Рассмотрена организация единого

информационного пространства предприятия (ЕИП). Проведен критический анализ известных подходов и решений по распределению средств вычислительной техники на предприятиях. Выявлены основные проблемы, связанные со значительным увеличением количества используемых компьютеров, недостаточностью развития системного подхода к управлению комплексом СВТ.

Предложена организационная структура для управления комплексом СВТ научно-производственного предприятия в составе ЕИП (рисунок 1). В нее входят: система поддержки принятия решений (СППР), база данных (БД) СВТ предприятия, управление информационных технологий (УИТ), планово-экономическое управление (ПЭУ), управление персоналом, система мониторинга технического состояния КСВТ. Информация о выполняемых и планируемых производственных задачах поступает в СППР из системы управления инженерными данными (PDM), которая, в свою очередь, связана с системой планирования ресурсов (ERP) и системой управления жизненным циклом продукции (PLM).

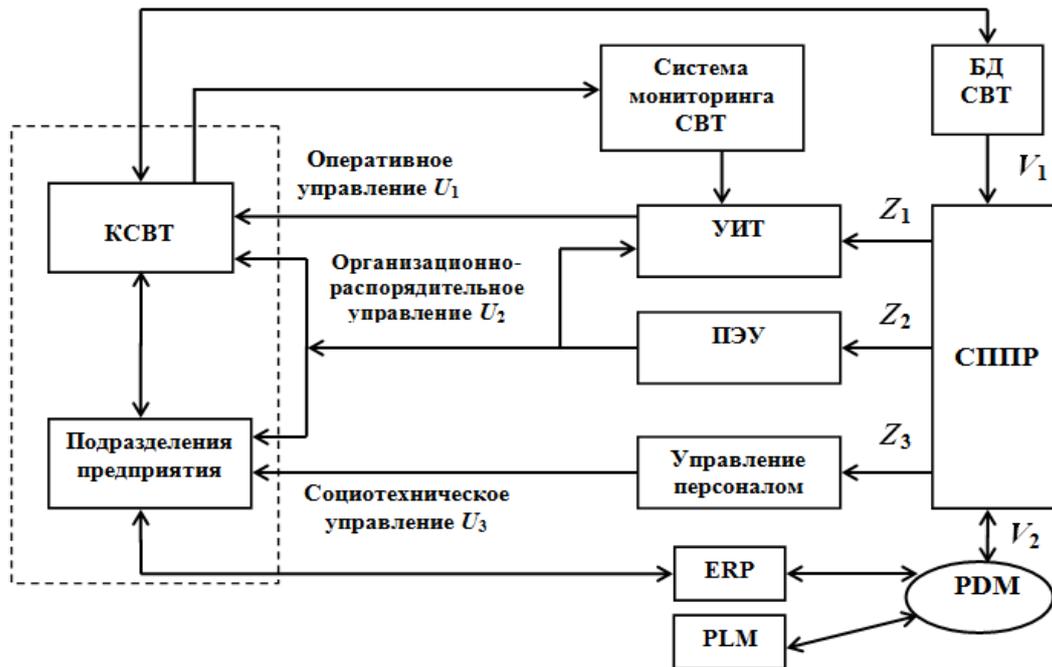


Рисунок 1 – Структурная схема управления комплексом СВТ на предприятии

Для решения указанных задач в диссертации разработан комплекс системных моделей, входящих в состав СППР и охватывающих различные стадии жизненного цикла средств вычислительной техники предприятия. Взаимосвязь предложенных моделей осуществлена на основе оптимизационно-имитационного подхода (рисунок 2). Модель  $M_1$  реализуется в виде оптимизационной задачи (ОМ) распределения СВТ по подразделениям. Решение  $A_{opt}$  этой задачи дает первоначальный вариант распределения СВТ по подразделениям предприятия.

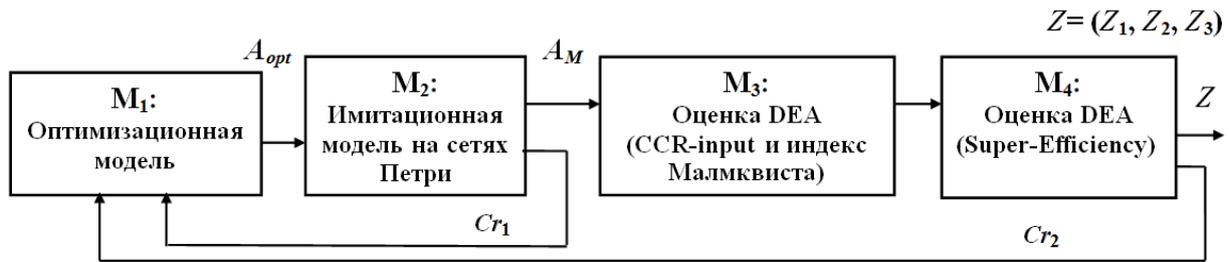


Рисунок 2 – Гетерогенные системные модели

Имитационная модель  $M_2$  представляет сеть Петри, решение  $A_M$  которой описывает поведение полученной структуры информационной системы. В случае обнаружения конфликтных ситуаций, критических путей и других особенностей работы КСВТ проводится коррекция  $Cr_1$  оптимизационной задачи  $M_1$ . Оценка эффективности решения проводится с использованием метода DEA, реализуемого с помощью моделей линейного программирования: модели Чарнеса – Купера - Роуда (CCR)  $M_3$  и модели суперэффективности  $M_4$ . Для оценки эффективности СВТ в различные периоды эксплуатации в диссертации использован индекс Малмквиста. Если необходимые показатели не достигнуты, то проводится коррекция  $Cr_2$  задачи  $M_1$ .

Окончательный набор решений  $Z = (Z_1, Z_2, Z_3)$  является основой для выработки управляющих воздействий  $U = (U_1, U_2, U_3)$  в системе управления КСВТ (рис. 1). Компонентами вектора  $U$  являются: а)  $U_1$  – оперативное управление комплексом СВТ в процессе его эксплуатации; б)  $U_2$  – организационно-распорядительное управление по закупке и распределению СВТ; в)  $U_3$  – социотехническое управление штатным составом подразделений и компетенциями сотрудников в области использования СВТ.

Системные модели положены в основу разработанной методики принятия решений при управлении средствами вычислительной техники на предприятии. Методика реализуется выполнением следующих этапов:

1. Формирование календарно-сетевых графиков основных производственных задач и определение ключевых показателей функционирования подразделений, учитывающих характеристики необходимых средств вычислительной техники.

2. Формулировка и решение задачи целочисленного программирования с булевыми переменными первоначального распределения компьютерного оборудования по подразделениям с учетом выполняемых производственных задач.

3. Имитационное моделирование процесса эксплуатации СВТ в подразделениях в соответствии с производственными графиками и с учетом вероятностных законов появления основных событий: запросов на техническое обслуживание и отказов оборудования.

4. Принятие решения о коррекции оптимизационной задачи при невыполнении условий эксплуатации, выявленных на этапе имитационного моделирования.

5. Решение задачи DEA сравнительной оценки по ключевым производственным индикаторам эффективности распределения СВТ.

6. В случае выполнения всех заданных условий вариант распределения СВТ передается в планово-экономическое подразделение предприятия.

7. При невыполнении части или всех условий повторяются пункты 1 и 2.

**Во втором разделе** выполняется постановка и решение оптимизационной задачи, относящейся к классу задач о назначениях. Решение такой задачи дает первоначальное распределение компьютеров по производственным задачам, но без учета возможных алгоритмических ограничений. Согласно оптимизационно-имитационному подходу верификация таких ограничений выполняется на следующем этапе анализа с помощью имитационных моделей.

В процессе системного анализа комплекса СВТ предприятия было установлено, что наиболее часто используются критерий стоимости КСВТ и критерий своевременного выполнения производственных задач. В диссертации предложено минимизировать суммарную стоимость капитальных и эксплуатационных затрат на компьютерное оборудование с ограничениями по срокам завершения задач.

Множество вычислительных задач, выполняемых в данный период на предприятии, обозначается, как  $Z = \{z_k\}$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Пусть на предприятии имеется множество подразделений  $P_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ , оснащенных средствами вычислительной техники. Множество типов средств ВТ равно  $Q = \{q_m\}$ ,  $m = \overline{1, I^{TS}}$ ,  $I^{TS}$  – число всех типов компьютеров, входящих в СВТ предприятия. Тип вычислительного средства  $q_m$  может иметь набор различных конфигураций,  $D_{mn}$ ,  $n = \overline{1, I_m}$ , где  $I_m$  – число возможных конфигураций данного типа СВТ. Каждая конфигурация описывается вектором параметров  $(d_{m,n,1}, \dots, d_{m,n,L(n)})$ , где  $L(n)$  – число параметров. Параметры основных компьютеров, использующихся для проектных работ на предприятии: стоимость, мощность, производительность, объем основной памяти, объем жесткого диска.

Целевая функция  $F$  задачи минимизации стоимости КСВТ предприятия при решении заданного множества задач  $Z$  выглядит следующим образом:

$$F = \min \left\{ \sum_{k,j,m,n} (C_{kjmn} + C_{kjmn}^E) x_{kjmn} \right\}, \quad (1)$$

где  $C$  – капитальные затраты на КСВТ,  $C^E$  – эксплуатационные затраты на КСВТ.

Булева переменная оптимизации:

$$x_{kjmn} = \left\{ \begin{array}{l} 1 - \text{если для решения } k\text{-й задачи в } j\text{-м подразделении} \\ \quad \text{для экземпляра СВТ } m\text{-го типа выбрана } n\text{-я конфигурация,} \\ 0 - \text{в противном случае.} \end{array} \right\}.$$

Ограничения для задачи (1) определяются следующим образом.

1. Назначение каждой задаче  $k$  не менее одного экземпляра СВТ

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{I^{TS}} \sum_n^{I_m} x_{kjmn} \geq 1, \quad k = \overline{1, K}. \quad (2)$$

2. Назначение каждому подразделению  $j$  не менее одного экземпляра СВТ

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{I^{TS}} \sum_{n=1}^{I_m} x_{kjmn} \geq 1, \quad j = \overline{1, J}. \quad (3)$$

3. Необходимо учитывать ограниченность количества средств вычислительной техники нужных конфигураций в данный момент при проведении распределения СВТ. Условие ограничения на ресурсы экземпляров СВТ:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{kjmn} \leq H_{mn}, \quad \forall m, n, \quad (4)$$

где  $H_{mn}$  – количество экземпляров СВТ  $m$ -го типа и  $n$ -й конфигурации, доступных к распределению.

4. При решении задачи  $z_k$  соответствие параметров конфигурации СВТ заданным границам  $d_{mnv}^{\min}$  и  $d_{mnv}^{\max}$  определяется набором неравенств:

$$d_{mnv}^{\min} \leq d_{mnv} x_{kjmn} \leq d_{mnv}^{\max}, \quad \forall k, j, m, n, v = \overline{1, L_{mn}}, \quad (5)$$

5. Для оценки надежности СВТ используется комплексный показатель:

$$S_G P_{KSVT}(x_{kjmn}) P_Z^j \geq P_b, \quad j = \overline{1, J}, \quad k \in I_j^Z, \forall m, n, \quad (6)$$

где  $P_b$  – заданный уровень надежности,  $S_G$  – коэффициент готовности комплекса СВТ,  $P_{KSVT}$  – вероятность безотказной работы КСВТ при выполнении множества задач  $Z$ ,  $P_Z^j$  – вероятность правильной обработки задач  $Z$  программными средствами подразделения  $j$  за заданное время.

Решение оптимизационной задачи  $M_1$  (1) – (6) на этапе экспериментов проводилось для подразделений Управления по проектированию. Это связано с тем, что такие задачи требуют использования нескольких типов СВТ: графических, инженерных, офисных, серверных. Информация о возможных типах и конфигурациях компьютеров находится в общей базе данных КСВТ предприятия. Размерность задачи для рассматриваемого случая: число подразделений в управлении по проектированию  $J=35$ ; число задач проектирования  $K=50$ ; число типов средств вычислительной техники  $M=7$ ; число различных конфигураций СВТ  $L=80$ .

Было выполнено тестовое решение задачи оптимизации для периодов 2017 – 2018 годов с целью сравнения с фактическим распределением СВТ на предприятии в эти периоды (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты тестового решения

Показатель	Стоимость СВТ, млн. руб.		Эксплуатационные расходы, млн. руб.	
	2017 г.	2018 г.	2017 г.	2018 г.
Фактическое распределение СВТ	12,1	14,6	3,16	3,89
Оптимальное решение	11,37	13,28	2,86	3,41
Эффективность оптимального решения	6%	9%	9,5%	12,3%

Результат решения показывает, что использование предложенного метода позволило бы снизить в среднем капитальные затраты на 7,5 % и эксплуатационные затраты на 11 %.

**В третьем разделе** предложена и исследована иерархическая имитационная модель на стохастических временных раскрашенных сетях Петри, описывающая функционирование комплекса СВТ при выполнении заданного набора производственных задач с определенными сроками их выполнения.

Временная сеть Петри есть кортеж:

$$TSPN = (CPN, \Theta 1, \Theta 2, \Theta 3),$$

где  $CPN$  – основная раскрашенная сеть Петри,  $\Theta 1$ ,  $\Theta 2$ , и  $\Theta 3$  - временные задержки, приписанные позициям, дугам и переходам сети соответственно.

Основные проблемы эффективного использования СВТ возникают при организации технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). На рисунке 3 показана модель для исследования статистических характеристик ТО и Р компьютеров в подразделениях.

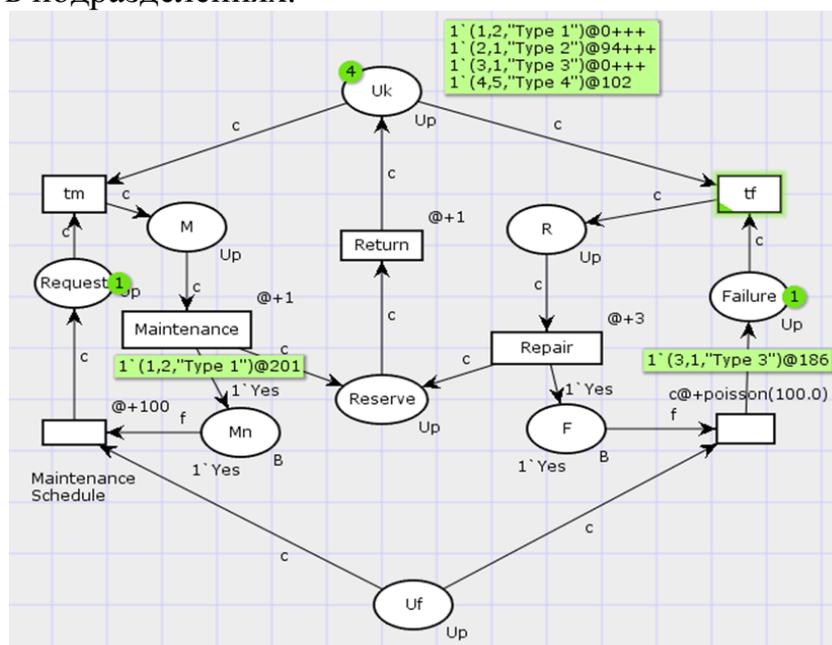


Рисунок 3 – Модель отказов и вывод компьютеров на ремонт и техническое обслуживание

Разработана и исследована иерархическая имитационная модель НРН на сетях Петри, реализующая системную модель М2 в целом (рисунок 4). Модули на каждом уровне описывают процессы с большей детализацией. Эти модули, в свою очередь, могут представлять собой сети Петри любой сложности.

Каждый компьютер имеет индивидуальные временные параметры, связанные с эксплуатацией и обслуживанием. К таким параметрам относятся: остаточный ресурс, время до профилактического обслуживания, время наработки на отказ, время выработки (время активной работы компьютера).

Иерархическая сеть НРН включает три уровня модулей. Первый уровень состоит из следующих модулей:

1. Модуль Sch обрабатывает планирование задач и назначение компьютеров для задач.

2. Модуль ZO обрабатывает операции с производственными задачами.
3. Модуль MR имитирует процессы технического обслуживания и ремонта.
4. Модуль RS моделирует ресурсы для обслуживания и ремонта.

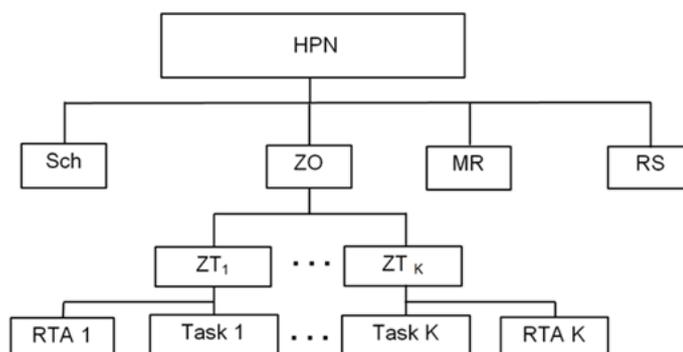


Рисунок 4 – Структура иерархической имитационной модели HPN

Для моделирования каждой задачи в подразделении используется индивидуальный модуль ZT. Совокупность модулей  $ZT_1, \dots, ZT_K$  образует второй уровень иерархии модели. На третьем уровне находятся модули Task и RTA. Модуль Task соответствует диаграмме Ганта данной задачи, а модули RTA описывают конкретные компьютеры, выполняющие эту задачу. Все модели на сетях Петри реализованы в программной системе CPN Tools.

Основной набор цветов  $U$  определяется в модели HPN как кортеж

$$U = (id, md, rt, rl, mt, ti, ta),$$

где  $id$  – идентификатор компьютера,  $md$  – модель и конфигурация,  $rt$  – время работы компьютера после последнего обслуживания или ремонта,  $rl$  – остаточный ресурс,  $mt$  – оставшееся время до технического обслуживания по расписанию,  $ti$  – начальный момент времени нового периода эксплуатации,  $ta$  – суммарное время наработки компьютера.

Временные параметры  $rt$ ,  $rl$ ,  $mt$ ,  $ti$  и  $ta$  используются для управления остаточным сроком службы компьютера. Остаточный ресурс учитывается только для активного компьютера, т.е. участвующего в процессе выполнения производственной задачи (параметр  $rl$ ). В периоды обслуживания или ремонта компьютера время  $rt$  не меняется.

В диссертации разработана оригинальная модель на сети Петри, реализующая модуль RTA анализа временных параметров компьютера. Модуль выполняет проверку условий  $n \geq rl$  (остаточный ресурс) и  $n \geq mt$  (время до обслуживания). Если выполняется хотя бы одно условие, идентификатор компьютера передается в модуль MR обслуживания и ремонта.

Кроме того, для организации прогнозного обслуживания компьютеров в модуле RTA предусмотрена имитация событий отказов или запросов на техническое обслуживание по заданным вероятностным законам. В диссертационной работе рассмотрены пуассоновский и нормальный законы, параметры которых определяются на основе статистических данных об эксплуатации СВТ на предприятии.

В четвертом разделе предложен и исследован алгоритм оценки эффективности распределения и функционирования СВТ, использующий метод DEA. Схема алгоритма приведена на рисунке 5.

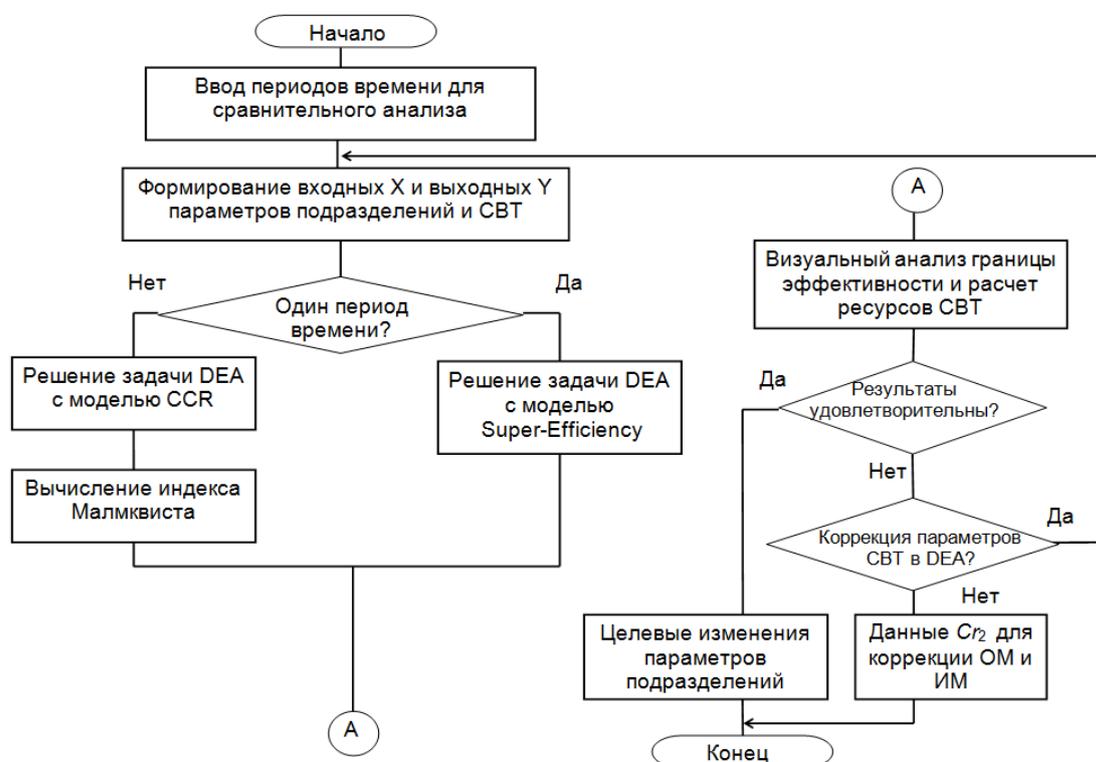


Рисунок 5– Схема алгоритма сравнительной оценки СВТ на основе метода DEA

На начальном этапе формируются матрицы  $X$  входных и  $Y$  выходных параметров множества исследуемых подразделений предприятия.

Для  $n$  подразделений основная CCR модель DEA-метода представлена в виде решения  $n$  задач линейного программирования:

$$\left. \begin{aligned} \min_{\theta, \lambda} \theta, \\ -y_i + Y\lambda \geq 0, \\ \theta x_i - X\lambda \geq 0, \\ \lambda \geq 0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\theta$  - интегральный критерий эффективности исследуемого подразделения,  $X$  - матрица входов,  $Y$  - матрица выходов,  $x_i$  и  $y_i$  - вектор-столбцы индивидуальных входов и выходов для  $i$ -го подразделения в  $X$  и  $Y$  соответственно,  $\lambda$  - вектор взвешивания,  $\lambda_i \geq 0, \forall i=1, \dots, n$ .

В качестве примера расчета и анализа эффективности распределения и эксплуатации КСВТ предприятия была рассмотрена совокупность из двух конструкторских К1 и К2 и трех проектных подразделений П1, П2 и П3. В работе было предложено использовать параметры и ключевые показатели эффективности:  $X_1$  - количество сотрудников в подразделении,  $X_2$  - число компьютеров в подразделении,  $X_3$  - средняя производительность компьютеров (GFlops),  $X_4$  - объем задач,  $X_5$  - число графических станций типа 1,  $X_6$  - число графических станций типа 2,  $X_7$  - число инженерных компьютеров,

$Y1$  – суммарная стоимость средств вычислительной техники в подразделении,  $Y2$  – удельный объем выполняемых задач на одного сотрудника.

Исследование эффективности проектных и конструкторских подразделений предприятия проводилось на input-ориентированной модели CCR с не уменьшаемым эффектом масштаба (NDRS), а также на модели ВСС с переменным эффектом масштаба (VRS) в режиме нахождения границы суперэффективности (Simple Super Efficiency).

Полученные с помощью программного средства PIMDEA Soft V. 3.0 результаты анализируются аналитиком системы поддержки принятия решений СППР. Для оценки развития подразделений в рассматриваемые периоды времени (2017 и 2018 годы) в работе с использованием модели  $M_3$  CCR был рассчитан индекс Малмквиста  $MI$  (таблица 2).

Таблица 2 – Индекс Малмквиста

Индекс Малмквиста	Подразделение				
	К1	К2	П1	П2	П3
$MI$	0,96	0,82	0,95	1,0	1,0

Значение  $MI < 1$  подтверждает сделанный при анализе вывод о неэффективном использовании вычислительной техники в некоторых подразделениях (К1, К2, П1) при переходе от 2017 года к 2018 году.

На рисунке 6 и рисунке 7 приведены примеры построения границы эффективности в пространстве параметров подразделений.

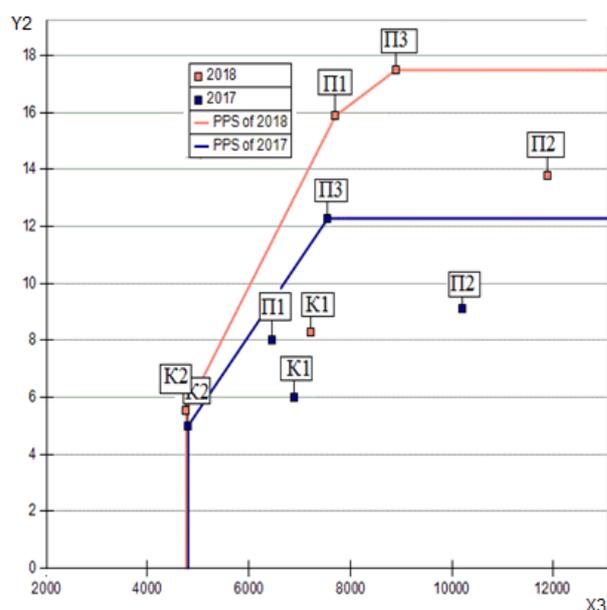


Рисунок 6 - Граница эффективности в зависимости от удельных объемов выполняемых задач ( $Y2$ ) и производительности компьютеров ( $X3$ ) для двух периодов

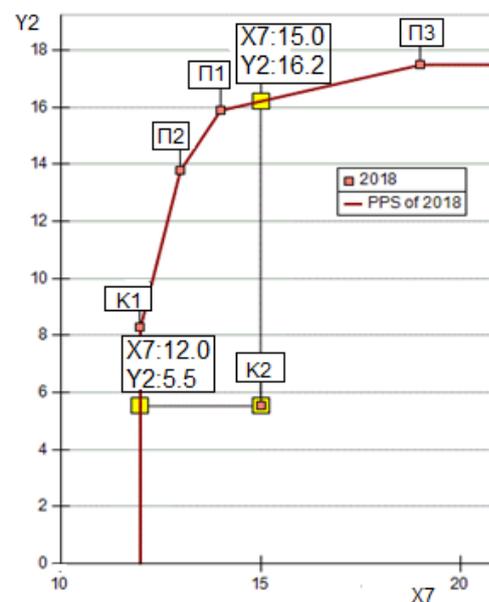


Рисунок 7 - Целевые изменения параметров  $X7$  и  $Y2$  подразделения К2 для выхода на границу эффективности

В результате исследования системных моделей  $M_3$  и  $M_4$  формируются целевые изменения  $\delta X$  и  $\delta Y$  для параметров СВТ и подразделений, выводящие их на границу эффективности.

Автором разработана программа визуализации результатов анализа эффективности компьютерного оборудования, которая используется аналитиком экспертной системы СППР для управления КСВТ.

**В пятом разделе** описаны экспериментальные исследования при использовании системных моделей и алгоритмов для распределения СВТ в проектных подразделениях предприятия АО «РКЦ «Прогресс». Задача решалась для семи проектных групп ПГ1- ПГ7. При формировании системной модели  $M_1$  была поставлена и решена задача целочисленного линейного программирования (ЦЛП) с булевыми переменными в виде, соответствующем формулировке (1) – (6). В таблице 3 приведены результаты решения задачи оптимального распределения компьютеров, где пара (m,n) обозначает компьютер типа m с конфигурацией n.

Таблица 3 – Результаты сравнения оптимального решения и фактического распределения в 2019 году

Проектные группы	Назначение компьютеров в проектные группы				Минимально допустимая производительность, GFLOPS
	Плановое распределение СВТ в 2019 году	Производительность СВТ в ПГ, GFLOPS	Оптимальное распределение СВТ	Производительность СВТ в ПГ, GFLOPS	
ПГ1	(1.1), (1.2), (2.3)	324	(1.1), (1.2), (2.2)	309	300
ПГ2	(1.1), (2.2), (2.3), (3.1)	434	(3.1), (3.2)	530	400
ПГ3	(1.1), (1.2), (2.1), (3.1), (3.2), (3.2)	1109	(3.2), (3.2), (3.2)	900	900
ПГ4	(1.1), (2.2), (3.1), (3.2)	719	(3.1), (3.2), (3.2)	760	700
ПГ5	(1.2), (3.1), (3.2)	650	(3.2), (3.2)	600	600
ПГ6	(1.1), (3.2)	409	(3.2)	300	300
ПГ7	(1.1), (1.2), (2.1), (3.2)	579	(1.1), (1.2), (3.2)	529	500
Суммарная стоимость СВТ, тыс. рублей		1360,3		1056	

Капитальные затраты на приобретение новой техники, рассчитанные на основе разработанной методики, на 22,3% меньше фактических затрат в 2019 году, когда решения принимались без учета многих важных факторов. В то же время суммарные производительности компьютеров в проектных группах не меньше заданных пороговых значений. Положительный эффект достигнут за счет исключения избыточного количества компьютеров, назначенных, в первую очередь, подразделениям ПГ2, ПГ3 и ПГ7.

На следующем этапе была исследована имитационная модель  $M_2$ .

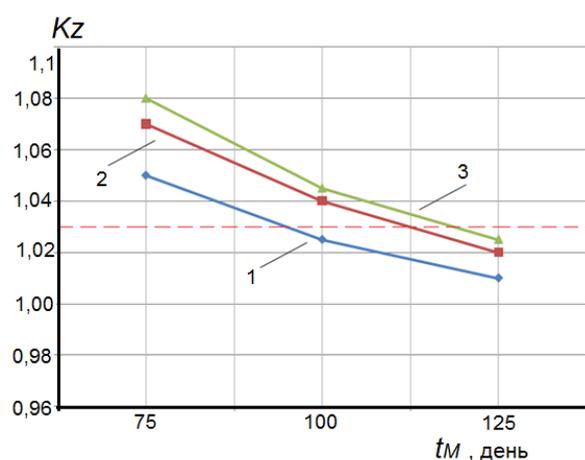
В процессе имитации для проектных групп фиксировался коэффициент невыполнения задач в срок:

$$K_Z = \Theta_S(\lambda, t_M, t_O, t_R) / \Theta_Z,$$

где  $\Theta_Z$  – плановый срок выполнения всей задачи  $Z$ ,  $\Theta_S$  - время выполнения задачи  $Z$  на имитационной модели,  $t_M$  - период между техническим обслуживанием оборудования,  $t_O$  - время технического обслуживания,  $t_R$  - время ремонта компьютера,  $\lambda$  – интенсивность отказов.

На рисунке 8 приведен один из графиков, полученных по результатам имитации процесса выполнения проектных задач. Допустимое значение сдвига срока выполнения работы было принято  $K_Z = 1,03$ . Из графика можно определить период  $t_M$  технического обслуживания в зависимости от времени ремонта  $t_R$ .

На третьем этапе была выполнена сравнительная оценка эффективности распределения компьютерного оборудования на основе полученных решений. На рисунке 9 показана диаграмма для двух периодов времени (первое и второе полугодие 2019 года), характеризующая положение проектных групп относительно границ эффективности.



1)  $t_R=2$  дня; 2)  $t_R = 4$  дня; 3)  $t_R = 6$  дней

Рисунок 8 - Зависимость коэффициента  $K_Z$  от периода технического обслуживания  $t_M$  и времени ремонта компьютеров  $t_R$  при  $\lambda=0,022$

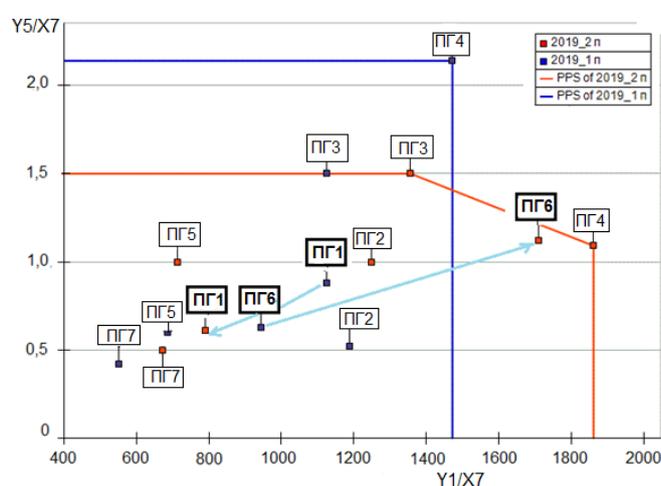


Рисунок 9 - Положение проектных групп относительно границ эффективности в зависимости от суммарной производительности компьютеров  $Y_1$ , удельного объема работ на сотрудника  $Y_5$  и коэффициента изменения срока проектов  $X_7$

На рисунке 9, в частности, стрелками показано перемещение двух проектных групп: во втором полугодии 2019 года группа ПГ6 улучшила свои показатели, тогда как группа ПГ1 переместилась в пространстве параметров дальше от границы. Это связано с тем, что во 2-м полугодии в ПГ1 установлены компьютеры с суммарной производительностью  $Y_1=908$  GFlops. Однако, для выхода ПГ1 на границу эффективности необходимо иметь производительность  $Y_1=1470$  GFlops. Кроме того, в результате коэффициент изменения срока проекта  $X_7$  вырос до 1,15, что означает задержку выполнения проекта на 15% и увеличение штрафных баллов  $X_6$  до 15.

Разработанная программа визуализации границы эффективности позволяет провести анализ до 30 аналогичных диаграмм для определения целевых изменений параметров.

Таким образом, применение разработанной в диссертации методики поддержки принятия решений позволяет:

а) выполнить начальное распределение компьютеров по подразделениям по критерию минимума затрат,

б) выявить критические участки на графиках производственных задачи технического обслуживания СВТ,

в) оценить эффективность полученного варианта распределения СВТ.

**В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в работе:**

1. Проведен системный анализ существующих методов поддержки принятия решений при управлении средствами вычислительной техники в подразделениях научно-производственного предприятия. Выявлены проблемы и недостатки существующих технологий принятия решений по распределению и эксплуатации комплекса средств вычислительной техники предприятия.

2. Предложена методика поддержки принятия решений, основанная на итерационной процедуре последовательного анализа разработанных гетерогенных системных моделей в составе системы поддержки принятия решений. Совокупность гетерогенных системных моделей описывает как распределение средств вычислительной техники на предприятии, так и процессы эксплуатации компьютерного оборудования в соответствии с целями и графиками производственных задач.

3. Поставлена и решена задача целочисленного линейного программирования с булевыми переменными назначения СВТ для выполнения производственных задач в подразделениях предприятия, содержащая новый набор ограничений, сужающий область возможных решений для получения первичного варианта распределения СВТ.

4. Разработана системная имитационная модель на стохастических временных раскрашенных сетях Петри для верификации решения задачи назначения средств вычислительной техники. Это позволяет учесть известную информацию о вероятностных законах отказов компьютерного оборудования, организовать прогнозное техническое обслуживание на основе данных об условиях эксплуатации СВТ, планировать резервирование оборудования. Применение имитационной модели обеспечило снижение задержек завершения производственных задач до величины не более 3% от плановых сроков.

5. Разработан алгоритм сравнительной оценки эффективности использования средств вычислительной техники в подразделениях предприятия, основанный на методе Data Envelopment Analysis. Результаты получены в виде вариантов распределения СВТ в многомерном пространстве параметров относительно границы эффективности. Такой подход обеспечивает аналитиков предприятия информацией о целесообразности принятия того или иного решения по назначению компьютеров, что позволяет уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты на СВТ в диапазоне от 10 до 25 %.

6. Разработанные модели и алгоритм использованы при оснащении компьютерной техникой проектных подразделений предприятия АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара. В результате получено уменьшение

финансовых затрат на 22% и сокращение сроков технического обслуживания СВТ.

### Научные публикации по теме диссертации

#### Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ:

1. **Учайкин, Р.А.** Задача распределения средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии/ **Р.А. Учайкин, С.П. Орлов**//Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. – 2019. – Вып. 4(69). – С. 84–98.

2. **Учайкин, Р.А.** Сравнительная оценка эффективности компьютерной техники в подразделениях промышленного предприятия / **Р.А. Учайкин, С.П. Орлов** //Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. – 2020. – № 1(65). – С. 74–86.

3. **Учайкин, Р.А.** Система принятия решений при управлении компьютерной техникой проектных групп на машиностроительном предприятии/**Р.А. Учайкин** // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2021. – № 1 (57). – С. 23-35.

4. Сусарев, С.В. Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств/ С.В. Сусарев, С.П. Орлов, Е.Е. Бизюкова, **Р.А. Учайкин**// Известия Санкт-Петербургского гос. технолог. ин-та (технического университета). – 2021. – Вып. № 58(84). – С. 98-104.

#### В международных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

5. Orlov, S.P. System models of organization the use of computer equipment for mechanical engineering production/S.P. Orlov, **R.A. Uchaikin**, A.V. Burkovsky// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol.862 (042004).

6. **Uchaikin R.A.** Optimization-simulation approach to the computational resource allocation in a mechanical engineering enterprise/**R.A. Uchaikin, S.P. Orlov**// Journal of Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1679 (032015).

7. Orlov, S.P. Colored Petri Net Models for Computer Equipment Maintenance Management at an Enterprise / S.P. Orlov, **R.A. Uchaikin** //International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2021. – P. 812–817.

8. Orlov, S.P. Application of Hierarchical Colored Petri Nets for Technological Facilities Maintenance Process Evaluation/ S.P. Orlov, S.V. Susarev, **R.A. Uchaikin** // Applied Sciences.– 2021. – Vol. 11 (11). –P. 5100.

#### Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

9. **Учайкин Р.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021 668 653. Программа визуализации результатов анализа эффективности компьютерного оборудования /**Р.А. Учайкин**. Зарегистрировано 18.11.2021. – М.: Роспатент, 2021.

#### Публикации в других изданиях:

10. **Учайкин, Р.А.** Автоматизированное управление использованием средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии / **Р.А.**

**Учайкин, С.П. Орлов** //Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. Т. 12. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – С. 81–87 .

11. **Учайкин, Р.А.** Метод анализа обеспеченности подразделений предприятия средствами вычислительной техники/ **Р.А. Учайкин** // Перспективные информационные технологии (ПИТ – 2020): сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2020. – С. 402 – 405.

12. **Учайкин, Р.А.** Модели организации технического обслуживания и ремонта вычислительной техники на крупном машиностроительном предприятии / **Р.А. Учайкин** // Наука и Мир. – 2020. –Т.2 – №12 (88). – С. 45–48

13. Сусарев, С.В.. Моделирование процессов прогнозного технического обслуживания роботизированных агротехнических автомобилей/С.В. Сусарев, С.П. Орлов, Е.Е. Бизюкова, **Р.А. Учайкин**//Математические методы в технологиях и технике. - 2021. - № 1.- С. 148-153.

14. **Учайкин, Р.А.** Системные модели при распределении вычислительной техники в проектных подразделениях машиностроительного предприятия/**Р.А. Учайкин**//Труды X Всеросс. конф. «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии» (КИП-2021); Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург,2021. – С. 79-83.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол № 4 от 08.02.2022 г.)

Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной полиграфии  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244