

На правах рукописи



Лоскутов Иван Андреевич

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО
ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ЭНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

2.5.22 – Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и в ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА) в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на крупный научный проект по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от «23» апреля 2024 г.

Научный руководитель:

Скворцова Дарья Александровна
к.т.н., доцент

Официальные оппоненты:

Баурова Наталья Ивановна
д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», декан факультета дорожных и технологических машин

Одинокоев Сергей Анатольевич
д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры 1105

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится « ____ » _____ 2024 года в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.18 на базе Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 7, ауд. 414 МТ.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим выслать по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Е.С. Постникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Имеются строгие ограничения в сроках строительства атомных электростанций (АЭС), что обуславливает необходимость сокращения времени изготовления комплектующих изделий. В связи с этим, требуется разработка универсальных моделей, учитывающих большинство аспектов создания оборудования, в том числе системы управления (СУ) защитой реактора (далее - специальное оборудование для АЭС). Основные особенности организации производства специального оборудования, ограничивающие выбор инструментов организации производства: единичный или мелкосерийный тип производства, высокая степень проработки технологической и конструкторской документации, строгие требования по обеспечению безопасности. При этом рабочий персонал на подобных предприятиях не меняется достаточно продолжительное время, что позволяет моделировать характеристические функции, необходимые для совершенствования методов планирования и более гибко управлять производственными процессами даже в случае возникновения сложных ситуаций.

Неоднократно отмечалось, что в Российской Федерации требуется развитие инструментов организации и планирования гибкого мелкосерийного производства, в том числе, оборудования в энергомашиностроении. Высокая трудоемкость и затратность таких производств снижает темпы развития инфраструктуры малых и средних предприятий, что ограничивает количество поставщиков оборудования, комплектующих, определяет низкую конкуренцию в производственном секторе. В результате на производстве используется типовая конструкторская и технологическая документация, не учитывающей особенности конструкции и технологии, свойственные конкретному изделию.

В этих условиях применение современных методов имитационного моделирования для нормирования технологического процесса даст возможность решить задачу совершенствования организации производства, с учетом индивидуальных особенностей работников, определением параметров моделей путем анализа наблюдаемых данных и результатов моделирования. Имитационное моделирование с определением коэффициентов, учитывающих влияние методов и средств управления производственным процессом и его результативностью, позволит повысить точность расчёта времени операций и переходов. Разработка имитационной и математических моделей технологического процесса для гибкого нормирования с учетом поправочных коэффициентов позволит организовать производство специального оборудования для АЭС.

Степень разработанности проблемы

В конце 60-х годов в СССР сложилось несколько серьезных научных школ

по моделированию. Заметное место среди них занимал коллектив кафедры ЭВМ МВТУ им. Н.Э. Баумана, возглавляемый профессором Б.В. Анисимовым.

Научными исследованиями в области имитационного моделирования известны труды Р. Шеннона, Н.П. Бусленко, Дж. Клейнена, И.Н. Коваленко, В.В. Калашникова, Б.Я. Советова, А.А. Вавилова, С.В. Емельянова, Б.Ф. Фомина, В. Томашевского, Ю.Г. Поляка, Р. Сэджента, Дж. Карсона, А. Ло, М. МакКомаса и др. К ним можно отнести труды отечественных ученых В.В. Девяткова, И.М. Якимова, В.М. Попова, Г.П. Солодкова, В.М. Топилина, Н.Б. Кобелева.

Среди современных работ по направлению стоит отметить труды В.С. Анфилатова, А.А. Емельянова, А.А. Кукушкиной, А.П. Шелеста, И.А. Плужковой, П.А. Дроговоза, И.Н. Омельченко, С.Г. Фалько, М.Е. Сироткина.

Значимую роль в развитии науки в области математического и имитационного моделирования, имеют труды А.В. Старикова и И.С. Куцевой, Г.Л. Нохриной, С.А. Зотовой, Д.К. Агишевой, В.Б. Светличной и Т.А. Матвеевой, А.И. Орлова, а также Л.В. Кремлевой в области моделирования с использованием искусственных нейронных сетей.

Цель работы заключается в разработке имитационной модели производственного процесса изготовления специального оборудования энергомашиностроительного комплекса, использование которой позволит сократить сроки изготовления специального оборудования систем защиты реактора АЭС.

Задачи исследования:

1) Провести анализ производственных процессов изготовления специального оборудования для АЭС, выявить факторы, влияющие на длительность производственных циклов.

2) Разработать интегральные критерии качества управления, учитывающие особенности применяемых типов управления и организации производственного процесса изготовления специального оборудования для АЭС и его результатами.

3) Разработать оптимизационную модель человеко-машинной системы с учетом особенностей организации производства специального оборудования для АЭС.

4) Провести интеграцию оптимизационной модели с имитационной моделью производственного процесса изготовления специального оборудования для системы защиты реактора АЭС.

Объект исследования – процесс организации и планирования производственного процесса изготовления специального оборудования системы защиты реактора АЭС.

Предмет исследования – имитационная модель производственного процесса изготовления специального оборудования системы защиты реактора АЭС.

Методы исследования

Теоретические наработки в диссертации основываются на положениях организации производства, методах моделирования технологических процессов и производств, логического, аналитического и сравнительного подходов. Эмпирическая часть базируется на нормативно-технических документах, основах программирования, моделирования. Проводимые исследования базируются на научных трудах специалистов в областях организации производства, моделей функционирования человеко-машинных производственных систем.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Определены факторы, оказывающие влияние на длительность технологического процесса изготовления специального оборудования системы защиты реактора АЭС.

2. Рассчитаны интегральные критерии качества управления технологическим процессом изготовления специального оборудования системы защиты реактора АЭС, учитывающий точность, запас устойчивости и быстродействие.

3. Разработаны оптимизационные модели человеко-машинных производственных систем гибкого мелкосерийного производства специального оборудования системы защиты реактора АЭС для решения задачи технологического проектирования с учетом особенностей процессов.

4. Разработан инструмент решения задачи рациональной организации производственного процесса с целью сокращения времени изготовления специального оборудования системы защиты реактора АЭС на основе интеграции оптимизационных моделей процессов с методом агентного имитационного моделирования с использованием языка программирования и среды Matlab.

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении закономерностей и объяснении сущности решения задачи модификации принятой в промышленности организации производства с учетом технологических параметров процесса изготовления специального оборудования, в частности, системы защиты реактора АЭС.

Практическая значимость работы заключается в возможности уменьшить длительность технологических процессов изготовления специального оборудования системы защиты реактора АЭС. Разработанная модель позволяет проводить динамическое нормирование операций технологических процессов с учетом мелкосерийного характера производства.

Положения, выносимые на защиту

1. Интегральные критерии качества управления, полученные путем экспертной оценки влияния организационных структур и типов управления на точность выполнения заданий, устойчивость управления и быстроту принятия решений.

2. Оптимизационные модели функционирования человеко-машинных производственных систем изготовления специального оборудования систем защиты реактора АЭС, разработанные для проектирования технологического процесса с учетом влияния интегральных критериев качества управления.

3. Агентная имитационная модель, учитывающая оптимизационные модели процессов, для рациональной организации производства с целью сокращения времени изготовления специального оборудования системы защиты реактора АЭС.

Соответствие паспорту специальности. Согласно паспорту специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства, задачи, рассмотренные в диссертации, соответствуют областям исследований:

16. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов.

23. Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

Достоверность и внедрение результатов работы. По результатам диссертационной работы имеется акт частичного внедрения на предприятии ООО «Генон». Основные проблемы обсуждались на научных докладах и в научно-исследовательских работах ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет» и в ФГАОУ ВО «Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях: 2-4 научно-технические конференции московского технологического университета (МИРЭА, МГУПИ, МИТХТ), 2017, 2018, 2019; International scientific – Practical Conference «Information Innovative Technologies», Прага, 23-27 апреля, 2018; Российская научно-техническая конференция с международным участием «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» (РНТК ФТИ-2018), Москва, 12-13 апреля, 2018; XV международная научно-техническая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (ИНФО-2018), Сочи, 1-10 октября, 2018; International scientific – Practical Conference «Information Innovative Technologies», Прага, 22-26 апреля, 2019; Российская научно-техническая конференция с международным участием «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» (РНТК ФТИ-2019), Москва, 11-12 апреля, 2019; XVI международная научно-техническая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» (ИНФО-2019), Сочи, 1-10 октября, 2019; International scien-

tific – Practical Conference «Information Innovative Technologies», Прага, 20-24 апреля, 2020; Российская научно-техническая конференция с международным участием «Инновационные технологии в электронике и приборостроении» (РНТК ФТИ-2020), Москва, 16-17 апреля, 2020; XV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция с международным участием «Молодежные исследования и инициативы в науке, образовании, культуре, политике, Биробиджан, 23-30 апреля, 2020; Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 25–27 мая 2020 года; V всероссийская (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов «Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения, Челябинск, 25 февраля, 2021; Первая международная научно-практическая конференция «Инженерно-техническое образование и наука», Новороссийск, 21,22 апреля, 2021.

Публикация результатов работы. По теме диссертационной работы опубликовано 30 научных работ. Общий объем – 12,72 п.л. (авторский вклад – 12,13 п.л.). Из них 6 научных работ в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России. Также имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 178 страницах текста и иллюстрированных 59 рисунками, 13 таблицами, списком литературы, включающего 131 наименование, и 6 приложениями. Общий объем работы 208 страниц.

Исследования проводились в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на крупный научный проект по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от «23» апреля 2024 г.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены направления и объект исследования, сформулированы цели и задачи, а также основные положения, составляющие научную новизну и практическую значимость работы.

В первой главе проведен анализ особенностей процесса производства оборудования для АЭС. Показано значение развития атомной энергетики в современную эпоху. Особое внимание уделено определению причин повышенной длительности циклов производства оборудования для АЭС, подходам и методам для их сокращения. Описаны методы моделирования процессов производства.

В главе дана характеристика рассматриваемого в работе специального оборудования для АЭС. Внешне силовое или управляющее оборудование представляет собой однодверный или двухдверный шкаф. Технологический процесс сборки силового или управляющего оборудования состоит из нескольких групп операций: сборочные и электромонтажные работы; лабораторные испытания с полным комплексом тестов, включая температурно-климатические; упаковка, которая включает в себя сборку тары и упаковку готового изделия. При создании специального оборудования необходимо учитывать требования стандартов, принятых в стране возведения атомного комплекса.

В результате анализа существующего технологического процесса изготовления специального оборудования для АЭС было выявлено, что основное влияние на длительность технологического процесса оказывают ненормированные операции по доработке деталей и сборочных единиц, а также наличие нерегламентированных перерывов. Таким образом, разработка математической модели технологического процесса позволит учесть все эти особенности.

Было доказано, что для моделирования мелкосерийной гибкой производственной системы наиболее подходящим является агентное моделирование.

Анализ существующего процесса конструкторской и технологической подготовки изготовления специального оборудования для АЭС показал, что необходимо внести следующие изменения:

- 1) этап разработки электросвязи оборудования необходимо проектировать совместно с электросхемами входящих компонентных изделий;
- 2) конструкторская и технологическая документация для силовых изделий, должна разрабатываться в соответствии со спиральным методом проектирования, который в отличие от последовательного (линейного) проектирования, регламентированного ГОСТ 2.103-2013, позволяет вести проектирование и разработку одновременно по всем возможным направлениям и вносить изменения на каждом этапе;
- 3) вместо осуществления последовательных операций электромонтажа ввести параллельно-последовательные операции по вязке жгутов;
- 4) группу операций по упаковке и транспортировке можно осуществлять параллельно с основными операциями технологического процесса.
- 5) в организации производства специального оборудования для АЭС необходимо провести соответствующие мероприятия по изменению методов контроля производственных процессов.

Во второй и третьей главах представлены математические модели технологического процесса изготовления специального оборудования для АЭС с использованием нечетких множеств. Во второй главе акцент делается на сборочных и упаковочных технологических процессах, в третьей – на электромонтажных.

Во второй главе проведен анализ факторов, влияющих на длительность технологического процесса. Для определения влияния организационной структуры и типа управления на длительность технологического процесса производства специального оборудования АЭС были определены интегральные критерии качества управления, рассчитанные на основе экспертных оценок, учитывающие точность выполнения задания, устойчивость управления и быстроту принятия решения:

$$\zeta = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{|K_j^{\Phi} - K_j^P|}{K_j^P} \right) w_j \quad \chi = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{|K_j^{\Phi} - K_j^P|}{K_j^P} \right) w_j$$

где: K_{ji}^{Φ} – расчетное значение показателя; K_{ji}^P – рекомендуемое значение показателя; w_j – вес показателя; ζ – интегральный критерий качества, зависящий от типа организационной структуры; χ – интегральный критерий качества, зависящий от типа управления.

За рекомендуемый параметр K_j^P было принято усредненное значение показателей точности выполнения задания, устойчивости управления и быстроты принятия решения, вес w_j определялся аналогично по усреднению экспертных оценок, проведенного путем онлайн опроса.

Процесс сборки оборудования для АЭС представляет собой совокупность операций технологического процесса зависящих от конфигурации изделия и последовательности выполнения операций. Так как сборка специального оборудования для АЭС осуществляется мелкими сериями или единично и имеет низкую степень унификации, то в технологический процесс включены операции по доработке компонентов. Совокупность операций по сборке можно представить нечетким множеством входных параметров $Y = \{x_y, \mu_y(x_y)\}$ и возмущающих параметров $R = \{x_R, \mu_R(x_R)\}$, где x_y, x_R – элементы соответствующих множеств, а $\mu_y(x_y), \mu_R(x_R)$ – соответствующие функции принадлежности.

В нечеткое множество входных параметров Y входят нечеткие подмножества: $A \subset Y, B \subset Y, C \subset Y, D \subset Y, E \subset Y, G \subset Y$, где:

A – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой операций x_A по сборке каркаса от производителя, т.е. $A = \{x_A, \mu_A(x_A)\}$;

B – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой операций по изготовлению деталей на предприятии x_B , т.е. $B = \{x_{Bi}, \mu_{Bi}(x_{Bi})\}$, при этом длительность операции зависит от сложности процесса изготовления деталей, которая может быть определена нечеткой логикой как: особо сложные, сложные, среднесложные и простые операции;

C – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой операций по доработке деталей и сборочных единиц x_C , т.е. $C = \{x_{Ci}, \mu_{Ci}(x_{Ci})\}$, при этом дли-

тельность операции зависит от сложности процесса доработки деталей и сборочных единиц, уровень сложности может быть определен нечеткой логикой как: сложные, среднесложные и простые операции;

D – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой операций x_D по демонтажу деталей каркаса от производителя, т.е. $D = \{x_D, \mu_D(x_D)\}$;

E – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой операций по доработке деталей каркаса x_E , т.е. $E = \{x_E, \mu_E(x_E)\}$;

F – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой операций по сборке деталей и сборочных единиц от производителя x_F , т.е. $F = \{x_F, \mu_F(x_F)\}$;

G – нечеткое подмножество параметров, связанных с группой операций по сборке деталей и сборочных единиц с использованием крепежных изделий x_G , т.е. $G = \{x_G, \mu_G(x_G)\}$.

В нечеткое множество возмущающих параметров R входят нечеткие подмножества: $H \subset R, I \subset R, J \subset R, K \subset R, L \subset R$, где:

H – нечеткое подмножество параметров, связанных с простым рабочим в процессе выполнения технологической операции или перехода x_H , т.е. $H = \{x_H, \mu_H(x_H)\}$;

I – нечеткое подмножество параметров, связанных с межцеховыми и междуменными перерывами x_I , т.е. $I = \{x_I, \mu_I(x_I)\}$;

J – нечеткое подмножество параметров, связанных с контролем качества x_J , т.е. $J = \{x_J, \mu_J(x_J)\}$;

K – нечеткое подмножество параметров, связанных с доработкой конструкторской и технологической документации x_K , т.е. $K = \{x_K, \mu_K(x_K)\}$;

L – нечеткое подмножество параметров, связанных с динамикой работоспособности в течении смены x_L , т.е. $L = \{x_L, \mu_L(x_L)\}$.

При этом каждое нечеткое подмножество нечеткого множества Y дизъюнктивно суммируется с нечеткими подмножествами нечеткого множества R :

$$A + H = (A \cap \bar{H}) \cup (\bar{A} \cap H)$$

$$\text{и } \mu_{A-H}(x) = \max(\min((\mu_A(x), 1 - \mu_H(x)); \min((\mu_A(x) - 1, \mu_H(x)$$

$$A + I = (A \cap \bar{I}) \cup (\bar{A} \cap I)$$

$$\text{и } \mu_{A-I}(x) = \max(\min((\mu_A(x), 1 - \mu_I(x)); \min((\mu_A(x) - 1, \mu_I(x)$$

$$A + J = (A \cap \bar{J}) \cup (\bar{A} \cap J)$$

$$\text{и } \mu_{A-J}(x) = \max(\min((\mu_A(x), 1 - \mu_J(x)); \min((\mu_A(x) - 1, \mu_J(x)$$

$$A + K = (A \cap K) \cup (\bar{A} \cap K)$$

$$\text{и } \mu_{A-K}(x) = \max(\min((\mu_A(x), 1 - \mu_K(x)); \min((\mu_A(x) - 1, \mu_K(x)$$

$$A + L = (A \cap \bar{L}) \cup (\bar{A} \cap L)$$

$$\text{и } \mu_{A-L}(x) = \max(\min((\mu_A(x), 1 - \mu_L(x)); \min((\mu_A(x) - 1, \mu_L(x)$$

Аналогично дизъюнктивно суммируются другие подмножества.

Таким образом, каждой конфигурации оборудования соответствует конкретный технологический процесс, который состоит из операций и переходов вышеописанных нечетких множеств и заданных соответствующих функций принадлежностей.

Задача поиска оптимальных параметров техпроцесса T_{Π} к созданию специального оборудования для АЭС сводится к определению целевой функции.

Базируясь на подходе Грифа М.Г., можно провести описание операции O_{Π} , как зависимости трех составляющих – сотрудника, занятого в работе C_K , процесса исполнения им операции $\Pi_{И}$, показателя эффективности сотрудника $\Pi_{ЭС}$, параметра утомляемости от выполнения процесса L :

$$O_{\Pi} = O_{\Pi}(C_K, \Pi_{И}, \Pi_{ЭС}, L)$$

В работе учитывается восемь видов T_{Π} , которые содержат в себе m количество операций. Сам техпроцесс может быть представлена как:

$$T_{\Pi_n} = \sum_{i=1}^m k_m O_{\Pi_m}$$

где: $n \in [1;8]$ – номер техпроцесса; O_{Π_m} – операция с номером m ; k_m – количество операций над элементом m ;

Т.к., несмотря на линейность процессов, O_{Π} может быть реализована по разному, соответственно и затраченное время будет вариативным, из чего задача поиска оптимального решения через возможные альтернативы ($Ал$) сводится к:

$$\begin{cases} K_{\text{опт}}(Ал) \rightarrow \max \\ T_{\text{опт}}(Ал) \rightarrow \min \\ Ал \in M_{\text{доп}} \subseteq M_{\text{ал}} \end{cases}$$

где: $K_{\text{опт}}$ – критерий оптимальности выполнения техпроцесса; $T_{\text{опт}}$ – оптимальное затраченное время на техпроцесс; $M_{\text{доп}}$ – множество допустимых альтернатив; $M_{\text{ал}}$ – множество альтернативных вариантов.

В таблице 1 сформулированы задачи оптимизации. Под $P_{\text{вер}}$ и $T_{\text{ср}}$ понимается вероятность верного исполнения и средней работы над операцией сотрудником, $L_{\text{ср}}$ – усредненное время его утомляемости. O_3 - ограничения задачи оптимизации, выраженные в возможности исполнения ветки альтернативы (физической возможности реализации последовательности группы процессов в рассматриваемом порядке). $P_{\text{доп}}$, $T_{\text{доп}}$ и $L_{\text{доп}}$ – допустимые значения соответствующих параметров.

Таблица 1 – Задачи оптимизации

Критерий	Ограничения
$P_{\text{вер}}(Ал) \rightarrow \max$ $Ал \in M_{\text{доп}}$	$P_{\text{вер}}(Ал) \leq P_{\text{доп}}$ $T_{\text{ср}}(Ал) \leq T_{\text{доп}}$ $O_3(Ал)$

Продолжение Таблицы 1

Критерий	Ограничения
$T_{\text{ср}}(Aл) \rightarrow \min$ $Aл \in M_{\text{доп}}$	$L_{\text{ср}}(Aл) \leq L_{\text{доп}}$ $P_{\text{вер}}(Aл) \geq P_{\text{доп}}$ $O_3(Aл)$
$L_{\text{ср}}(Aл) \rightarrow \min$ $Aл \in M_{\text{доп}}$	$T_{\text{ср}}(Aл) \leq T_{\text{доп}}$ $P_{\text{вер}}(Aл) \geq P_{\text{доп}}$ $O_3(Aл)$

Показано, каким образом будет проводиться последовательность действий по изготовлению специального оборудования. Важно отметить, что на каждом этапе техпроцесса все операции не распараллеливаются, т.к. выполнение осуществляется одним сотрудником. Алгоритм будет включать в себя определение множества элементов M , участвующих в T_{Π} и рассмотрение бинарных отношений следований Bin , которые будут соответственно:

$$Bin = \{ \langle O_i, O_j / O_i R O_j \Leftrightarrow O_i \neq O_j; O_i; O_j, O_j \in M \}, Bin \subseteq M^2$$

M задает множество, в котором операции в т.ч. будут повторяться, как, например, для крепления деталей в сборочных процессах, однако их отличие будет крыться в нумерации, потому в работе принимаем, что это разные O_{Π} . Элемент R говорит о том, что O_j будет следовать только после O_i и никак иначе в бинарном объединении, за исключением случая равнозначности операций (например, установка изделий на DIN рейку).

В целом же, возникают условия для реализации описанного подхода, которые, с учетом выявления i -го количества пересекающихся подмножеств $\Pi_{\text{одм}}$ будут:

- 1) для $\forall i: \Pi_{\text{одм}_i} \subseteq M$;
- 2) для $\forall i, \forall j: i \neq j, \Pi_{\text{одм}_j} \cap \Pi_{\text{одм}_i} = \emptyset$;
- 3) $\cup_{i=1 \dots m} \Pi_{\text{одм}_i} = M$;

В результате будет определен критический путь или их ряд (при равнозначности). Сами отношения следования по ним можно описать посредством матриц смежности и достижимости:

$$A = |a_{ij}|, A' = |a'_{ij}|$$

Для обеих матриц $i, j = 1 \dots n$, а для матрицы смежности также добавляется обязательное условие $a_{ij} = 1 \Leftrightarrow \exists O_i R O_j$.

В конечном результате были получены системы линейных уравнений для расчета параметров технологического процесса изготовления специального оборудования для АЭС. В первом приближении они выглядели следующим образом:

$$\begin{cases} i_j = \sum_{\omega=1}^{17} (x_{\omega} + 2J_{1\omega}) \\ \bar{X} = \sum_{j=1}^{17} \sum_{\vartheta=i_{j-1}}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_{\mu}^{i_j-\vartheta} + \sum_{j=18}^{23} \sum_{\delta=\zeta_{j-1}}^{\zeta_j} t_j \prod_{\xi=18}^j L_{\xi}^{\zeta_j-\delta} \prod_{\psi=1}^{17} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta} . \end{cases}$$

где: i_j – множество элементов нечетких множеств Y и R ; t_j – длительность операций; x_{ω} – количество операций работы с элементом из множества Y ; $J_{1\omega}$ – количество ошибок, возникающих при работе с элементом множества Y ; $\prod_{\mu=1}^j L_{\mu}^{i_j-\vartheta}$ – учет накопления утомляемости при операции с элементом из множества операций Y ; ζ_j – количество операций работы с элементом из множества операций R ; $\prod_{\xi=18}^j L_{\xi}^{\zeta_j-\delta}$ – учет накопления утомляемости при операции с элементом из множества операций R ; $\prod_{\psi=1}^{17} L_{\psi}^{x_{\psi}-\vartheta}$ – учет накопленной утомляемости после завершения множества операций Y .

В четвертой главе разработана агентная имитационная модель технологического процесса создания специального оборудования систем защиты реактора АЭС на основе интеграции оптимизационных моделей процессов с использованием объектно-ориентированного языка программирования и среды Matlab.

Для получения входных данных был проведен анализ длительности выполнения технологических операций и получены эргономические показатели 85-ти сотрудников.

Для изучения поведения гибкой мелкосерийной производственной системы и решения задачи моделирования целесообразно использовать агентное моделирование, так как оно изучает поведение децентрализованных агентов. Децентрализованными агентами в модели являются оборудование и рабочие. В работе приводится диаграмма классов агентной имитационной модели производства оборудования для АЭС.

Класс **Program** – класс, с которого начинается работа приложения. Статистический класс **RandomGenerators** содержит набор методов для генерации случайных чисел в соответствии с различными законами распределения (равномерный закон распределения, закон Гаусса, закон Вейбулла и пр.). Класс **Statistic** – содержит свойства и методы для сбора и обработки статистической информации в процессе имитационного моделирования. Класс **CommonDenial** описывает общую логику обработки организационно-технического отказа. Данный класс наследует следующие классы: **ProductionLine**, **Store**, **WorkPlace**. Класс **ProductionLine** – модель, которая содержит массив продуктов (собираемых изделий) и массив рабочих мест (объектов класса **WorkPlace**). Класс **WorkPlace** – модель рабочего. Каждый рабочий имеет порядковый номер, параметр утомляемости, модель отказов. Класс **ProductionSet** – класс, имитирующий технологический процесс с разным набором операций, соответствующих спецификации, и временем их выполнения. Класс **ExcelUtilities** содержат утилиты для построения графиков в MS Excel.

Имитационное моделирование работы агентов сборочного цеха выполняется итерационно. У каждого из классов (`AssemblyDepartment`, `Store`, `ProductionLine`, `WorkPlace`) описывающих основные элементы сборочного цеха, есть метод `RunIteration`, который задает логику выполнения одной итерации.

Время итерации для основного класса сборочного цеха `AssemblyDepartment` продолжается в течение времени, заданном в секундах в параметре `timeTotal`, а шаг изменения времени указан в секундах в параметре `timeDelta`. По умолчанию выбраны значения $\text{timeTotal} = 8 * 60 * 60 = 28800$ с (одна рабочая смена) и $\text{timeDelta} = 1$ с. Работа программы начинается с создания экземпляра класса `AssemblyDepartment` и экземпляра класса `Statistic`. Во время создания экземпляра класса `AssemblyDepartment` обнуляются счетчики времени и количества собранных изделий, генерируется новая производственная партия, создаются объекты входного накопителя (`initialStore`), выходного накопителя (`finalStore`) и конвейера (`productionLine`). Во время инициализации объекта конвейера, создается заданное количество рабочих мест. После инициализации запускается цикл итераций для экземпляра класса `AssemblyDepartment` посредством вызова метода `RunIteration`. В рассматриваемом примере моделируется 250 итераций, т.е. один год работы сборочного цеха (при условии работы в одну 8-ми часовую смену – что задается в переменной `timeTotal`). После каждой итерации в экземпляр класса `Statistic` записываются измеряемые параметры остальных объектов модели.

Метод `RunIteration` класса `AssemblyDepartment` представляет собой цикл от нуля до времени указанного в `timeTotal` с шагом `timeDelta`. Внутри цикла происходит последовательный вызов метода `RunIteration` для объектов `initialStore`, `finalStore` и `productionLine`. Основная часть алгоритма программы представлена на рисунке 1.

Работа имитационной модели показывает, что при рациональном использовании ресурсов с учетом дополнительных коэффициентов, время технологического процесса в среднем можно сократить на 10%.

Имитационное моделирование было проведено для следующих условий: шаг моделирования 1 сек, 10 сек, время 1 год = 250 раб. дней, время 5 лет = 1250 раб. дней к-т утомляемости = 0,2; 0,5; 0,7, вероятность отказа раб. места = 0.00001, МО времени простоя рабочих мест по закону Вейбула = $30 * 60$ сек, вероятность отказа оборудования = 0.00001, МО времени простоя оборудования по закону Вейбула = $30 * 60$ сек, для генерации размера партии МО = 50 (штук деталей), СКО = 20 (штук деталей), для генерации МО времени операции $5 * 60$ сек, для генерации СКО времени операции $1 * 60$ сек.

В результате работы имитационной модели построены графики нескольких типов с учетом отказов оборудования и рабочих мест и с учетом различных значений коэффициента утомляемости (0,2; 0,5; 0,7): зависимость количества собранных

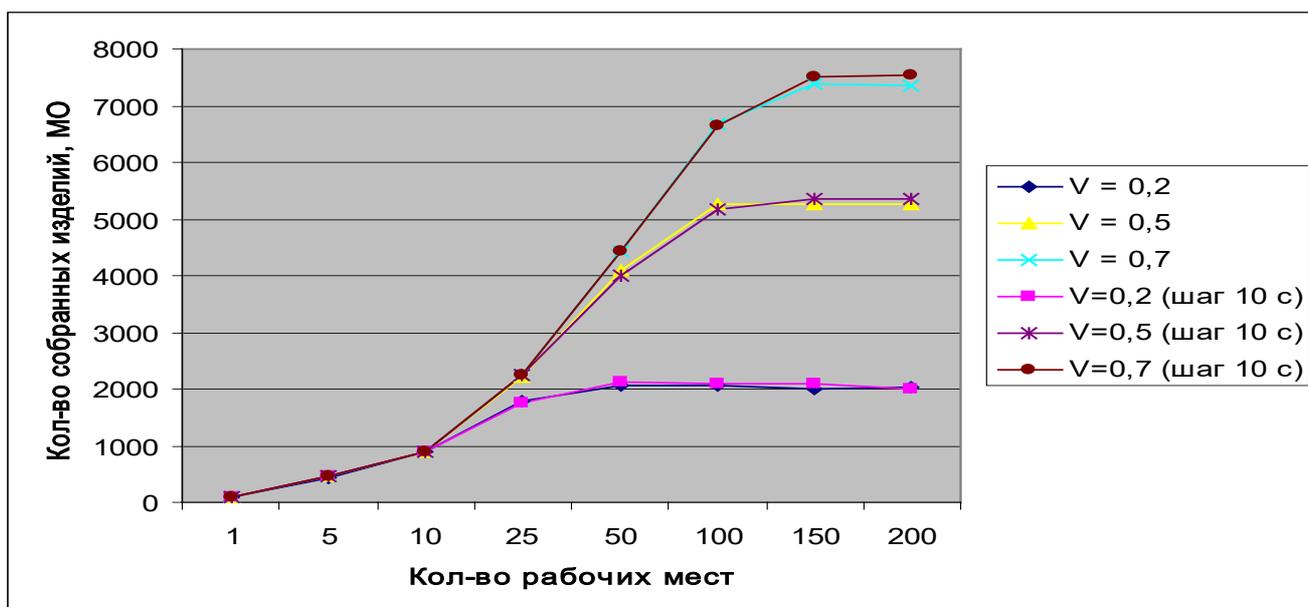


Рисунок 2 – Зависимость количества собранных изделий от количества рабочих мест

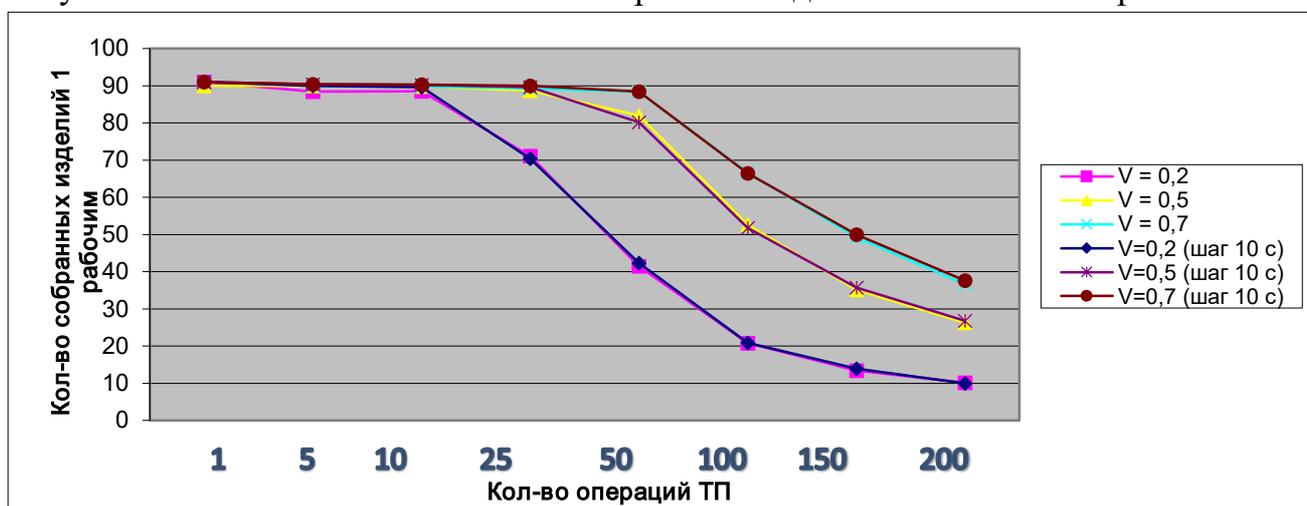


Рисунок 3 – Зависимость количества собранных изделий 1 рабочим от количества операций ТП

Взаимосвязь количества рабочих мест и количества собранных изделий при различных значениях коэффициента утомляемости, показал, что есть предел количества собираемых изделий, при котором дальнейшее увеличение числа рабочих мест не влияет на их количество, что объясняется максимальной загрузкой.

Влияние количества операций ТП и количества собранных изделий одним рабочим при различных значениях коэффициента утомляемости, показал, что при увеличении количества операций ТП приводит к снижению количества собранных изделий и эффективность работы постепенно снижается.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В Приложении А показано свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

В Приложении Б показаны организационные структуры и типы управления.

В Приложении В показана разработанная классификация методов моделирования технологических процессов.

В **Приложении Г** отображен пример реализации в Microsoft Excel.

В **Приложении Д** показан акт внедрения в ООО «Генон».

В **Приложении Е** показан акт внедрения в АНО ПОО «КЭПиИТ»

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. На основе анализа научно-методической литературы, а также нормативных документов атомной отрасли была обоснована потребность и возможность уменьшения сроков изготовления специального оборудования, сделан вывод о значимой роли применяемых стандартов.

2. Выявлены интегральные критерии качества управления, учитывающие влияние организационной структуры и типов управления на время технологического процесса изготовления специального оборудования энергомашиностроения.

3. Разработаны оптимизационные модели человеко-машинной системы, которые позволяют повысить точность расчета времени техпроцесса.

4. Разработана агентная имитационная модель на объекто-ориентированном языке программирования, в которую интегрированы оптимизационные модели человеко-машинной системы, интегральные критерии качества управления.

5. Результаты исследований прошли апробацию в АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», агентная имитационная модель внедрена для организации процессов в компании ООО «Генон». Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе в АНО ПОО «КЭПиИТ».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

Минобрнауки РФ по специальности 2.5.22

1. Лоскутов И.А. Стандарты применяемые при разработки силового и управляющего оборудования для АЭС // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2020. № 1(339). С. 144-150. (0,4 п.л.)

2. Лоскутов И.А. Динамическое нормирование с использованием метода агентного моделирования процесса сборки оборудования для атомных электростанций / И.А. Лоскутов, Д.А. Скворцова, В.Г. Искандарова // *Омский научный вестник*. 2023. № 1(185). С. 46-52. (0,74 п.л./0,5 п.л.)

3. Лоскутов И.А. Экосистемный контроллинг как решение сложной задачи оптимизации технологического процесса промышленного производства / И.А. Лоскутов, В.Г. Искандарова // *Омский научный вестник*. 2023. № 1(185). С. 53-57. (0,49 п.л./0,3 п.л.)

Научные статьи в других журналах, рекомендованных ВАК

4. Лоскутов И. А. Классификация методов моделирования производственного процесса // *Аудит и финансовый анализ*. 2018. №. 5. С. 30-37. (0,46 п.л.)

5. Лоскутов И. А. Нормирование сборочно-монтажных работ на предприятиях, разрабатывающих радиоэлектронное оборудование для АЭС // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46. №. 2. С. 89-97. (0,52 п.л.)

6. Лоскутов И. А. Нормирование сборочного техпроцесса каркаса силового и управляющего оборудования для АЭС методом моделирования // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. Т. 48. №. 3. С. 73-82. (0,58 п.л.)

Публикации в других изданиях – всего 24, из них основные:

7. Лоскутов И.А. Организационные структуры управления на предприятиях, занимающихся разработкой оборудования для АЭС // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 4. С. 40-46. (0,4 п.л.)

8. Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудование на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 6. С. 29-42. (0,81 п.л.)

9. Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудование на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС. Третье приближение // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 10. С. 46-54. (0,52 п.л.)

10. Лоскутов И.А. Определение нормированного времени сборки устройств для АЭС с учетом временных особенностей рабочих смен // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 8. С. 24-32. (0,52 п.л.)

11. Лоскутов И.А. Определение нормы рабочего времени сборки каркаса силового и / или управляющего, включая радиоэлектронное оборудования на предприятиях, занимающихся разработкой изделий для АЭС. Второе приближение // Вестник КемРИПК. 2018. № 2. С. 12-19. (0,46 п.л.)

12. Лоскутов И.А. Выбор типа управления на производстве, занимающегося разработкой оборудования в области мирного атома // Вестник КемРИПК. 2018. № 3. С. 18-26. (0,52 п.л.)

Свидетельство на программу для ЭВМ

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024667653 Российская Федерация Восстановление регрессии при анализе качества сборки : №2024661272 : заявлено 15.05.2024 : опубликовано 26.07.2024 / Скворцова Д.А., Романов Н.О., Лоскутов И.А., Фатклисламова И.И.; правообладатель Скворцова Д.А., Романов Н.О., Лоскутов И.А., Фатклисламова И.И. – Зарегистрировано в Реестр программ для ЭВМ.