ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ГУСЕВ Павел Юрьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ С НЕЧЕТКИМИ ПРАВИЛАМИ ДИСЦИПЛИНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ОЧЕРЕДИ

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор М.И.Чижов

Воронеж - 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4

1. Анализ методов исследования и моделирования многофазных многоканальных систем, отличающихся специфическими параметрами и нечеткостью дисциплины обслуживания очереди 10

1.1 Системы массового обслуживания и их классификация 11

1.2 Дисциплина обслуживания очереди требований в СМО 21

1.3 Программные комплексы имитационного моделирования обслуживающих систем 31

1.4 Цель работы и задачи исследования 41

2.Разработка дисциплины обслуживания очереди для СМО с нечеткими правилами 43

2.1 СМО с нечеткими правилами дисциплины очереди 44

2.2 Дисциплина обслуживания очереди на основе аппарата нечеткой логики ... 46

2.3 Алгоритмизация дисциплины обслуживания очереди с нечеткими правилами 56

Выводы 62

3.Разработка численного метода расчета количества устройств обслуживания в СМО с нечеткими правилами формирования очереди требований 63

3.1 Численный метод расчета количества устройств в СМО 64

3.2 Адаптация численного метода расчета количества устройств к нечетким правилам формирования очереди требований. 71

3.3 Алгоритм расчета количества устройств обслуживания с нечеткими правилами дисциплины очереди. 82

Выводы 88

Глава 4 Структура программного комплекса, экспериментальные исследования и результаты практической апробации 89

4.1 Структура модифицированного программного комплекса имитационного моделирования 90

4.2 Экспериментальные исследования разработанного внешнего модуля оптимизации и предложенного численного метода расчета количества устройств обслуживания в СМО 96

4.3 Результаты практической апробации программного комплекса 109

Выводы 121

Заключение 122

Список литературы 123

ПРИЛОЖЕНИЕ 135

Введение

Актуальность темы. В настоящее время к обслуживающим системам предъявляются высокие требования с точки зрения выбора оптимального количества устройств. Учет специфики вероятности поступления требований, длительности обслуживания, порядка выбора требований из очереди, существующей программы обслуживания, позволит определить оптимальные показатели системы, отвечающие поставленным перед ней задачам.

Значимые результаты в исследование функционирования и оптимизацию сложных систем внесли как иностранные, так и отечественные ученые. Первые положения теории массового обслуживания предложил А.К. Эрланг. Дальнейшим развитием положений теории массового обслуживания занимались советские ученые А.Я. Хинчин, А.Н. Колмогоров, Б.А. Севастьянов, а также иностранные учены Хемди А. Таха, Л. Клейнрок и др. Разработкой численных методов расчета параметров систем массового обслуживания занимались Г.И. Ивченко, А. Кофман и др.

Однако, несмотря на изученность области функционирования сложных систем, многие вопросы остаются нерешенными. Многочисленные известные формулы определения характеристик относятся, в основном, к системам массового обслуживания видов M/M/1, M/D/1, M/M/m, M/D/m с ограниченными вариантами правил дисциплин очереди. Поэтому возникает необходимость исследования систем, характеризующихся специфическими особенностями. Сложность таких систем диктует необходимость применения математических моделей и численных методов для получения точных характеристик их функционирования.

Важной задачей является выбор требований для обслуживания при специфичных дисциплинах очереди, отличающихся применением нечетких правил. Анализ и выявление закономерностей в отборе требований позволяет составить оптимальный план загрузки обслуживающей системы. Возможность

применения различных правил дисциплин очереди для устройств обслуживания в одной системе повышает гибкость и адаптивность системы.

Другой важной задачей является расчет количества устройств обслуживания при разных правилах дисциплин очереди. Учет особенностей дисциплины очереди обслуживающего устройства при управлении потоками требований позволит минимизировать простои в системе. Эффективное распределение потоков требований в системе может уменьшить время ожидания обслуживания.

Сложность современных систем обслуживания диктует необходимость создания программного комплекса, учитывающего все вышеперечисленные особенности. Для обеспечивания идентификации параметров системы требуются модули определения параметров и библиотеки оптимизации, обеспечивающие достоверность результата.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью точного расчета параметров сложных систем обслуживания, характеризующихся нечеткостью отбора требований.

Работа выполнена в рамках одного из основных научных направлений ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет» «Вычислительные комплексы и проблемно-ориентированные системы управления».

Цель работы. Целью данной диссертационной работы является разработка методов и средств исследования систем массового обслуживания с нечеткими правилами формирования дисциплины очереди, обеспечивающих высокую точность результата, на основе аппарата нечеткой логики и уравнений баланса.

Решаемые задачи:

- Разработка дисциплины обслуживания очереди требований для систем, отличающихся нечеткостью правил формирования очереди требований;
- Разработка численного метода расчета количества устройств обслуживания в системах с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди;

• Постановка оптимизационной задачи определения количества устройств обслуживания в условиях нечетких правил формирования очереди;

• Модификация программного комплекса имитационного моделирования, с целью добавления возможностей исследования СМО с нечеткими правилами дисциплины очереди;

• Практическая апробация разработанных методов и алгоритмов применительно к задаче идентификации параметров обслуживающей системы с нечеткими правилами дисциплины очереди в реальных условиях.

Методы исследования. В основу диссертационного исследования положены методы теории математического моделирования, имитационного моделирования, аппарата нечеткой логики, теории массового обслуживания.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

П.4 Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

П.5 Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

П.8 Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Научная новизна. В работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

• Дисциплина обслуживания очереди, обеспечивающая выбор требований в соответствии с заданными параметрами, и отличающаяся учетом нечетких правил формирования очереди требований в СМО;

• Численный метод расчета количества устройств обслуживания, реализованный в виде алгоритма определения показателей СМО с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди и отличающийся применением адаптированных уравнений баланса;

• Оптимизационная задача определения количества обслуживающих устройств, отличающаяся учетом нечетких правил формирования очереди требований, и позволяющая найти количество различных типов устройств обслуживания в СМО с учетом заданных ограничений;

• Структура программного комплекса имитационного моделирования, отличающаяся динамическим изменением правил очередей требований, и позволяющая проводить численные эксперименты с целью идентификации параметров обслуживающей системы с нечеткими правилами формирования очереди требований.

Практическая значимость работы. Предложенные в работе методы и алгоритмы реализованы в виде модифицированного программного комплекса имитационного моделирования, позволяющего рассчитывать параметры обслуживающих систем с нечеткими правилами дисциплины очереди.

В результате практической апробации программный комплекс продемонстрировал высокие показатели точности идентификации параметров СМО с нечеткими правилами дисциплины очереди.

Реализация и внедрение результатов. Результаты работы в виде имитационных моделей производства опробованы и внедрены на ОАО «ВАСО» и позволили проанализировать существующее производство, а также провести оптимизацию производственных ресурсов, необходимых для выполнения производственной программы выпуска деталей.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях, семинарах и совещаниях: XI, XII, XIII, XIV международных конференциях «Информатика: проблемы, методология, технологии» (Воронеж, ВГУ, 2011-2014); Всероссийской конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2011); Всероссийской конференции «Перспективное развитие науки, техники и технологий» (Курск, 2011); VII международной научно-технической конференции «Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе» (Воронеж, 2013); Международном межотраслевом молодежном научно-

техническом форуме «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2013); а также на научных семинарах кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования ФГБОУ ВПО «Воронежской государственный технический университет» (Воронеж, 2011-2014).

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в 18 публикациях, в том числе 7 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. В работах, опубликованных в соавторстве и приведённых в конце диссертации, лично соискателем предложены: [19] - дисциплина обслуживания очереди, характеризующаяся применением аппарата нечеткой логики, и численный метод расчета количества устройств обслуживания на основе уравнений баланса; [20, 21, 22, 23] - структура модифицированного программного комплекса имитационного моделирования; [17, 18] - структура модуля оптимизации имитационных моделей и постановка оптимизационной задачи.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Основная часть работы изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков и 14 таблиц. Список литературы состоит из 143 наименований.

Во введении показана актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, представлены основные научные результаты, определена их научная новизна и практическая значимость, приведено краткое содержание по главам.

В первой главе проведен анализ существующих методов и средств моделирования класса объектов, отличающихся специфическими параметрами и нечеткостью дисциплины обслуживания очереди.

Вторая глава посвящена разработке дисциплины обслуживания очереди с нечеткими правилами, отличающейся учетом характеристик требований.

В третьей главе представлен разработанный численный метод расчета количества устройств обслуживания в СМО с нечеткими правилами формирования очереди, отличающийся применением адаптированных уравнений баланса.

В четвертой главе представлена структура программного комплекса имитационного моделирования, адаптированная для моделирования СМО с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди. Проведены эксперименты с целью определения эффективности оптимизационного модуля и разработанного численного метода.

В заключении приведены основные выводы и результаты диссертационной работы.

1. Анализ методов исследования и моделирования многофазных многоканальных систем, отличающихся специфическими параметрами и нечеткостью дисциплины обслуживания очереди

В главе рассмотрены основные положения теории массового обслуживания. Проведена классификация систем массового обслуживания. Рассмотрен аппарат случайного распределения вероятностей поступления требований в систему.

Рассмотрены существующие дисциплины обслуживания очереди требований. Проведена их классификация. Проанализированы механизмы работы приоритетных и бесприоритетных дисциплин обслуживания.

Особое внимание уделено возможностям рассмотренных дисциплин обслуживания, их применению в различных обслуживающих системах.

В главе также рассмотрены возможности и характеристики комплексов имитационного моделирования. Проанализированы требования, предъявляемые к создаваемым имитационным моделям.

1.1 Системы массового обслуживания и их классификация

Характерной особенностью рассматриваемых в работе объектов является необходимость обработки требования на одном устройстве более чем один раз. При этом порядок обработки требования регулируется маршрутной картой. Другая отличительная особенность рассматриваемого класса объектов - это наличие устройства обработки, позволяющего одновременного принимать группы требований. Рассматриваемый класс объектов характеризуется вероятностным поступлением требований в систему и детерминированным временем обработки требований. Примерами таких объектов могут выступать: производство деталей из композиционных материалов, обрабатывающие центры механической обработки, транспортные перевозки грузов и т.д.

Дополнительным условием функционирования такой системы является наличие человека, управляющего загрузкой устройств. В таком случае функционирование объектов не всегда возможно описать четкими логическими рассуждениями. По этой причине необходимо применение нечеткой логики.

Для исследования класса объектов, отличающихся специфическими параметрами и нечеткостью дисциплины обслуживания очереди решено использовать положения теории массового обслуживания (ТМО). Исследование таких объектов необходимо начинать с рассмотрения основ ТМО, существующих дисциплин обслуживания очереди, методов имитационного моделирования обслуживающих систем.

Цель ТМО заключается в исследовании показателей систем массового обслуживания (СМО). СМО, в свою очередь, представляют собой технические устройства для обслуживания заявок или требований. При этом существенную роль играют случайные величины, определяющие время поступления и время обработки требований или заявок.

Основоположником ТМО считается датский ученый А.К. Эрланг. Он первым предложил использовать марковские процессы с дискретным множеством состояний для описания обслуживающих систем. Таким образом, ТМО

представляет собой математическую дисциплину, являющуюся разделом теории вероятностей.

Первые результаты, позволяющие определить характеристики обслуживающих систем, получены аналитическими способами. Эти способы долгое время оставались единственным вариантом изучения СМО. Однако, в связи с возникновением имитационного моделирования, аналитические способы исследования СМО утратили свою значимость. Кроме того, для большинства СМО необходимо искать свои методы исследования, учитывающие специфические особенности. Таким образом, создание имитационной модели для рассматриваемой СМО представляется наиболее оптимальным и точным методом исследования [3, 9, 122].

Однако, исследование системы имитационным моделированием, очень трудоемкий процесс. Помимо этого, программные комплексы имитационного моделирования не всегда позволяют учесть все особенности рассматриваемой системы. Поэтому аналитические методы, адаптированные для специфических особенностей СМО, остаются популярным средством исследования систем.

Разнообразие технических объектов, которые изучает ТМО, охватывает многие сферы деятельности человека. Изучение и развитие результатов, полученных в ходе исследования различных СМО, помогает решать важные задачи, касающиеся таких сфер деятельности, как: производство, здравоохранение, сфера обслуживания, логистика и т.д.

Несмотря на иногда кажущуюся простоту постановки задач, в ТМО используются самые различные методы математических дисциплин. Поэтому исследование СМО необходимо начинать с выбора и изучения методов, подходящих для исследования конкретной системы.

Важным этапом исследования является постановка задачи расчета показателей, определяющих эффективность работы СМО. Представление задачи в формальном математическом виде позволяет определить методы, необходимые для расчета показателей.

Все СМО характеризуются набором общих показателей, которые определяют функционирование системы в целом. К таким показателям относятся:

- входящий поток, определяет порядок поступления требований в систему;
- время обслуживания заявок – время, затрачиваемое устройствами обслуживания на обработку требований;
- дисциплина очереди – правила, регламентирующие порядок обработки требований из очереди;
- структура системы определяет типы и количество устройств обслуживания, их характеристики, наличие накопительных буферов и т.д.

Входящий поток характеризуется случайным временем поступления требований в систему. В более сложных системах требования отличаются по типу и, в каждый момент поступления заявки, тип требования имеет случайное значение [37, 38].

Ввиду того, что входящий поток – это набор моментов времени, то его характеристики можно изучать, не учитывая природу требований. В момент возникновения требования в системе происходит событие, поэтому входящий поток можно считать потоком событий.

Потоки входящих требований могут преобразовываться внутри системы. Это происходит, например, в том случае, если после обслуживания одним устройством требуется дополнительное обслуживание на другом устройстве. Также входящий поток может меняться в зависимости от состояния системы. Однако, для большинства случаев, входящий поток описывается как внешний по отношению к системе.

Случайный поток требований $\{t_k, k \geq 1\}$ на временном отрезке $[0,\infty)$ представляется как неубывающая случайная последовательность моментов $t_1, t_2, \ldots, t_k, t_1 \geq 0$, наступления некоторых событий. Аналогично можно определить случайны поток для любого временного отрезка $[a,b)$, где a и b могут принимать любые значения. Также a и b могут принимать значения бесконечности [35].

Если рассматривать поток $f(t)$ заявок, поступивших на временном отрезке $[0,t)$, то можно получить случайный процесс, являющийся непрерывным и неубывающим слева и принимающий целые неотрицательные значения. В обратном случае, если рассмотреть на отрезке времени $[0,t)$, любой непрерывный, неубывающий и принимающий целые неотрицательные значения процесс, то он задает некоторый случайный поток. Можно сделать вывод о том, что существует взаимное однозначное соответствие между случайными процессами и потоками, которые являются непрерывными и неубывающими слева, а также принимают целые неотрицательные значения.

Существует два наиболее распространенных способа задания случайного потока.

Первый способ заключается в задании функции распределения

$$F_{\xi 1,\xi 2,,\xi k}(x_1,x_2,...,x_k)=P\{\xi_1<x_1,\xi_2<x_2,...,\xi_k<x_k\}$$

для времен $\xi_i=t_i-t_{i-1}, i\geq 1, t_0=0$ между ближайшими поступлениями требований для любого $k\geq 1$.

Во втором способе на рассматриваемых случайных наборах интервалов $[0,t_1),[t_1,t_2),...,[t_{k-1},t_k)$, при $0<t_1<...<t_k, k\geq 1$, задаются распределения

$$G(m_1,...,m_k;t_1,...,t_k)=P\{f_1=m_1,...,\nu_k=m_k\}$$

чисел f_i, $i=\overline{1,k}$, поступивших на отрезках $[t_{i-1},t_i)$ требований.

Можно выделить три свойства случайного потока: ординарность, стационарность и отсутствие последствий.

Ординарность потока гарантирует выполнение следующего соотношения: $P\{f(t,t+\Delta)>1\}=l(\Delta)$, где $f(t,t+\Delta)$ - количество требований, поступивших на отрезке времени $[t,t+\Delta)$. Фактически, свойство ординарности означает возможность поступления заявок только по одной [2, 33, 107].

Стационарность случайного потока гарантирует неизменность вероятностного распределения с течением времени. То есть распределение требований, которые поступили на интервалах $[0,t_1),[t_1,t_2),...,[t_{k-1},t_k)$, такое же, что

и распределение требований, которые поступили на интервалах $[T,t_1+T),[t_1+T,t_2+T),...,[t_{k-1}+T,t_k+T)$. При этом T и k принимают любые значения, удовлетворяющие условиям $T>0$ и $k\geq 1$.

Отсутствие последствий обеспечивает независимость случайных значений $f_1,...,f_k$. Также можно сказать, что количество требований, поступивших на отрезке времени $[t_{i-1},t_i)$, не оказывает влияния на количество требований, поступивших на отрезках $[t_{j-1},t_j), j\neq i$.

Случайный поток, характеризующийся свойствами отсутствия последствий, стационарностью и ординарностью называется пуассоновским или, как еще можно назвать, простейшим потоком [54, 133].

Учитывая описанные выше свойства, можно найти некоторые характеристики пуассоновского потока. Так, можно найти вероятность того, что для пуассоновского потока $p_i(t)$, $i\geq 0$, на отрезке времени t поступит i требований. В первую очередь необходимо определить вероятность $p_0(t)$ того, что за отрезок времени t не поступит ни одного требования. Необходимо учесть, что событие «на отрезке времени $t+s$ не поступали требования» равносильно объединению событий «на отрезке времени t не поступали требования» и «на отрезке, находящемся справа от t и имеющем длину s, требования не поступали». Поэтому, учитывая свойства стационарности и отсутствия последствия пуассоновского потока, $p_0(t)$ удовлетворяет уравнению

$$p_0(t+s)=p_0(t)p_0(s)$$

Любое монотонно возрастающее и неотрицательное решение уравнения имеет вид $p_0(t)=e^{-\lambda t}$ или $p_0(t)=0$, при этом $0\leq\lambda<\infty$. Однако, если решение уравнения имеет вид $p_0(t)=0$, то на любом отрезке времени поступает бесконечное количество требований. Если $\lambda=0$, то $p_0(t)=1$ для всех $t>0$ и требования вообще не поступают в систему. Поэтому целесообразно рассматривать решение вида:

$$p_0(t)=e^{-\lambda t},\ 0<\lambda<\infty$$

Это решение означает, что время до поступления первого требования распределено по экспоненциальному закону с параметром λ.

При $\Delta \to 0$ можно получить

$$p_0(\Delta) = 1 - \lambda\Delta + l(\Delta) \qquad (1.1)$$

Вероятность $P_1(\Delta)$ того, что за отрезок времени Δ поступит хотя бы одно требование, можно записать в виде

$$P_1(\Delta) = \lambda\Delta + l(\Delta) \qquad (1.2)$$

Отсюда можно сделать вывод о том, что λ является параметром простейшего потока.

Для того, чтобы определить все остальные $p_i(t)$ при $i \geq 1$, необходимо рассмотреть моменты времени t и $t + \Delta$, где Δ - малое, по сравнению с t, приращение времени. Тогда, учитывая свойства стационарности и отсутствия последствия можно получить:

$$p_i(t + \Delta) = \sum_{j=0}^{i} p_{i-j}(t)\, p_j(\Delta)$$

Учитывая ординарность потока:

$$\sum_{j=2}^{\infty} p_j(\Delta) = P_2(\Delta) = l(\Delta)$$

Поэтому $p_1(\Delta) = P_1(\Delta) + l(\Delta)$. Отсюда, учитывая равенства (1.1) и (1.2), можно получить:

$$p_i(t + \Delta) = p_i(t)(1 - \lambda\Delta) + p_{i-1}(t)\lambda\Delta + l(\Delta)$$

Преобразовывая формулу, можно получить:

$$\frac{1}{\Delta}[p_i(t + \Delta) - p_i(t)] = -\lambda p_i(t) + \lambda p_{i-1}(t) + l(\Delta) \qquad (1.3)$$

Предполагая, что $\Delta \to 0$, можно получить систему уравнений:

$$\begin{cases} p_0(t) = e^{-\lambda t} \\ p_i'(t) = -\lambda p_i(t) + \lambda p_{i-1}(t), i \geq 1 \end{cases} \qquad (1.4)$$

Начальные условия: $p_i(0) = 0, i \geq 1$. Вследствие того, что в правой части (1.3) существует предел, то существует производная $p_i^{'}(t)$. Для решения системы (1.4) следует заменить $p_i(t) = e^{-\lambda t} q_i(t), i \geq 0$. В таком случае систему (1.4) можно привести к виду:

$$q_0(t) = 1,$$
$$q_i^{'}(t) = \lambda q_{i-1}(t), i \geq 1,$$

при этом начальные условия: $q_i(0) = 0, i \geq 1$. Интегрируя систему, можно получить:

$$q_i(t) = \frac{(\lambda t)^i}{i!}, i \geq 0,$$

Отсюда можно получить:

$$p_i(t) = \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}, i \geq 0.$$

В результате можно сказать, что число требований пуассоновского потока, которые поступят на любом временном интервале t, распределено по закону Пуассона с параметром λt [47, 50, 131].

Параметр λ также является интенсивностью, ввиду свойства ординарности пуассоновского потока. Среднее число требований, поступивших в систему за время t, будет равно λt.

Учитывая свойства пуассоновского потока, можно показать, что время между двумя соседними поступлениями требований буду независимыми случайными величинами, распределенными по экспоненциальному закону с параметром λ [63].

Следует отметить, что количество $f(t)$ заявок, поступивших за временной интервал $[0, t)$, представляет пуассоновский процесс. Пуассоновский процесс представляет собой процесс чистого размножения, в котором $\lambda_2 = \lambda$. То есть, другими словами, он является однородным марковским процессом, заданным матрицей интенсивности переходов $A = (a_{ij})$. В таком случае элементы a_{ij} определяются как:

$$a_{ij} = \begin{cases} -\lambda, если_ j = i, \\ \lambda, tckb + \ j = i + 1, \\ 0_в_остальных_случаях \end{cases}$$

Пуассоновский поток, в некоторых случаях, удобно определять, учитывая его поведение на «достаточно малом» интервале времени $[t, t + \Delta)$. Для такого случая можно сформулировать утверждение:

Поток является пуассоновским в том случае, если для ординарного случайного потока вероятность поступления требования на временном отрезке $[t, t + \Delta)$ равна $\lambda\Delta + l(\Delta)$, где λ не зависит от предыдущей истории потока до момента t.

Еще одно важное свойство пуассоновского потока можно сформулировать в виде: стационарное распределение по моментам поступления требования в систему обслуживания совпадает со стационарным распределением характеристики очереди по времени [86, 124].

Таким образом, рассмотрен основной способ задания входного потока требований в систему.

Класс существующих в реальности систем обслуживания разнообразен. Одну из основных классификаций СМО предложил Д.Кендалл. Она описывает простые однофазные системы.

Согласно классификации Кендалла описание системы состоит из 4 позиций. Первые две позиции состоят из букв или буквенных комбинаций. Последний две позиции занимают цифры [34, 52, 120].

Первая позиция классификации Кендалла описывает входной поток требований. Приняты следующие обозначения для описания входного потока:

- М – пуассоновский поток;
- Е – эрланговский поток (время между поступлениями распределено по закону Эрланга)
- Н – гиперэкспоненциальный;
- НЕ – гиперэрланговский;
- РН – распределение фазового типа;

- D – детерминированный поток;
- GI – обще-рекуррентный поток;
- G – произвольно-стационарный поток.

Иногда к буквенному обозначению потока добавляется индекс, указывающий целочисленное значение распределения [45].

Комбинация букв или одна буква на второй позиции в классификации обозначает распределение времени обслуживания требования. Приняты следующие буквенные обозначения:

- D – время обслуживания фиксировано;
- G – рекуррентное обслуживание;
- PH – PH-распределение времени обслуживания;
- HE – гиперэрланговский закон распределения;
- M – экспоненциальный закон распределения;
- E – эрланговский закон распределения.

Третья позиция в классификации описывает количество обслуживающих устройств в системе.

Четвертая цифра показывает объем буфера или накопителя.

Третья и четвертая позиции могут заменятся переменными в случае, если их значения не определены. Четвертая позиция также может обозначаться символом бесконечности, если емкость накопителя не ограничена [24].

Если в приведенной выше классификации первые две позиции занимают буквы M, E, H, HE, PH, то СМО называется марковской системой. Основным отличием таких систем выступает то, что они могут быть описаны марковскими процессами с дискретным множеством состояний и непрерывным временем. Иногда также эти системы также могут описываться процессами размножения и гибели. Для изучения марковских систем возможно использование уже известных математических методов, которые себя хорошо зарекомендовали.

Система, в которой время обслуживания распределено экспоненциально, а поступление описывается пуассоновским законом, зачастую называется экспоненциальной [29, 31].

Для классификации сложных систем разработаны другие способы, но только классификации Кендалла является общепринятой. Большая часть этих классификаций представляет собой расширение классификации Кендалла. В них вводятся дополнительные типы систем: приоритетные, многоканальные, многофазные и т.д.

Система массового обслуживания, в которой требование проходит несколько устройств обслуживания, называется многофазной обслуживающей системой. В такой системе могут присутствовать как однотипные, так и разнотипные требования [87, 99, 123].

Многофазные СМО можно разделить на 2 вида: открытые и замкнутые. В замкнутых СМО требования перемещаются с устройства на устройство с какой-то вероятностью. При этом новые требования в систему не поступают, а уже находящиеся в ней не покидают систему.

В открытую многофазную СМО поступают требования, проходят несколько стадий обслуживания, согласно маршрутной карте, и покидают ее.

Многоканальный СМО называются такие системы, в которых обслуживание требований происходит параллельно на нескольких устройствах обслуживания.

Таким образом, описаны основные положения ТМО, рассмотрена классификация СМО, и дано определение многофазным многоканальным системам обслуживания.

1.2 Дисциплина обслуживания очереди требований в СМО

В СМО на каждое устройство поступает поток требований. Перед каждым устройством формируются очереди, состоящие из ожидающих требований. Дисциплина, которая регламентирует выбор требований для обслуживания именуется дисциплиной обслуживания (ДО) очереди. Каждая дисциплина обслуживания очереди основывается на определенном наборе правил, регулирующих продвижение очереди.

На рис. 1.1 представлена схема одноканальной системы обслуживания без отказов.

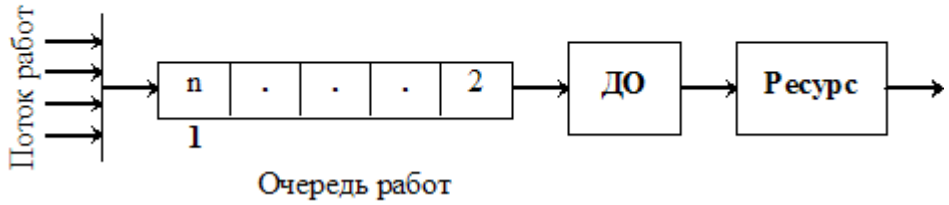


Рис. 1.1 – Одноканальная СМО без отказов

Учитывая, что время ожидания обслуживания для всех требований различно, то даже при одинаковом времени обслуживания время нахождения в системе для всех заявок будет различно [60, 64, 138].

К дисциплинам обслуживания очереди предъявляются определенные требования. Одними из основных требований выступают: эффективность работы, т.е. обеспечение равного времени ожидания для всех заявок и минимальность трудоемкости работы дисциплины.

Дисциплины обслуживания можно разделить на виды:

- Бесприоритетные дисциплины
    - линейные
        - в порядке поступления (FIFO)
        - в инверсионном порядке (LIFO)

        - случайный выбор (RANDOM)
    - Циклические дисциплины
        - циклический алгоритм (RR)
        - многоуровневый циклический алгоритм (FB)
        - смешанный алгоритм
- Приоритетные дисциплины обслуживания очереди
    - с фиксированным приоритетом
        - с относительным приоритетом (ОП)
        - с абсолютным приоритетом (АП)
        - адаптивное обслуживание
    - с динамическим приоритетом
        - в зависимости от времени ожидания
        - в зависимости от времени обслуживания

Также можно выделить зависимость пребывания требований в очереди. Время пребывания требований в очереди зависит от:

- дисциплины обслуживания
- трудоемкости задания
- интенсивности поступаемых задач.

Бесприоритетные дисциплины обслуживания очереди выбирают требования без учета необходимости их обслуживания. Чаще всего выбор происходит на основании времени поступления [41, 139].

Линейные дисциплины обслуживания, как правило, характеризуются одинаковым средним временем ожидания. Основные линейные дисциплины обслуживания очереди:

- FIFO. «Первый пришел – первый ушел». Дисциплина обслуживания выбирает требований с максимальным временем ожидания в очереди.
- LIFO. Такая дисциплина обслуживания реализует принцип стека. То есть первым на обслуживания поступает требование с минимальным временем нахождения в очереди.

- RANDOM. Выбор требований происходит в случайном порядке. При этом может использоваться любой алгоритм определения случайного значения

Циклические дисциплины обслуживания очереди основаны на циклических перестановках требований в очереди. Основные типы циклических дисциплин:

- RR – Robin Round. Круговой циклический алгоритм. Схема классической дисциплины обслуживания RR представлена на рисунке 1.2.

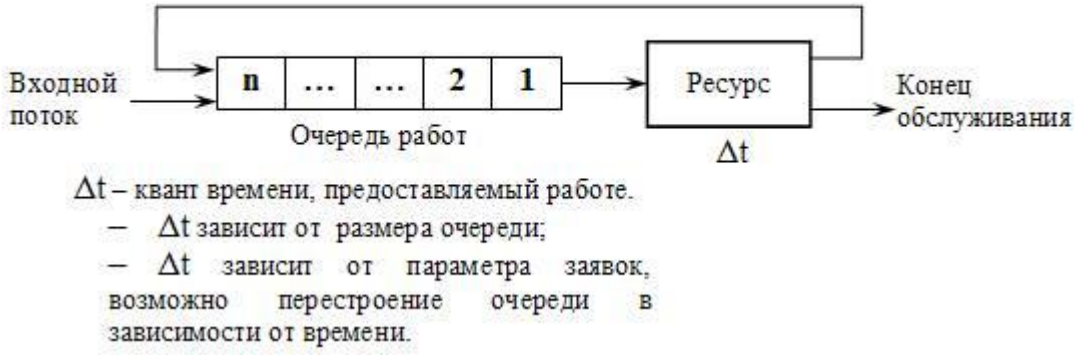


Рис. 1.2 – Циклическая очередь RR

- FB – Feed Back. Циклический алгоритм с множеством уровней и обратной связью. Схема циклической дисциплины обслуживания FB представлена на рис. 1.3.

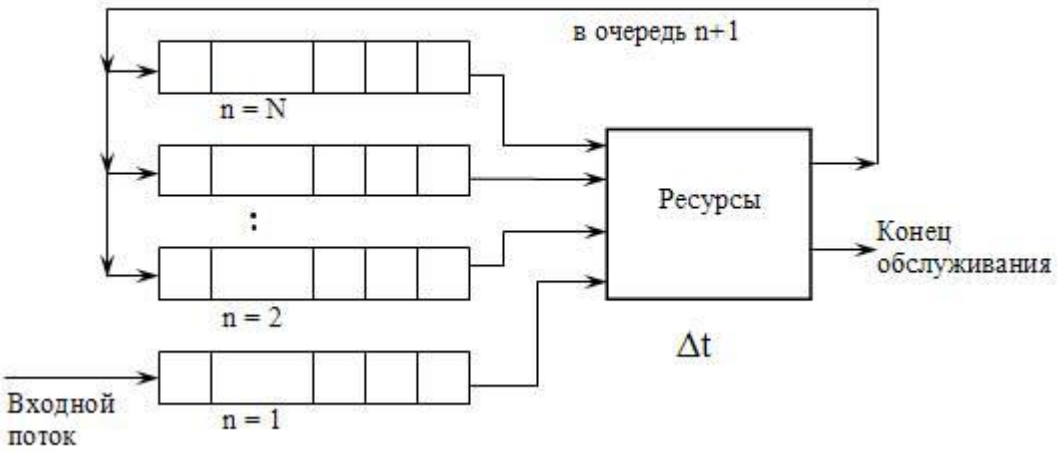
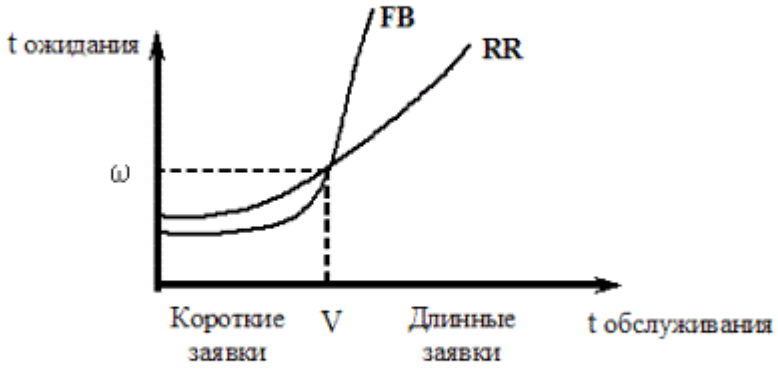


Рис. 1.3 – Циклическая очередь FB

n=1 – первая очередь, в которую поступает входной набор требований. Из первой очереди требование поступает на устройство обслуживания и или обслуживается или поступает в очередь с номером n+1. Требование в n-ой очереди обслуживается только тогда, когда пусты все очереди с номером, меньшим n. В очереди с максимальным индексом заявки обслуживаются по принципу FIFO [94].

Для бесприоритетных дисциплин обслуживания очереди требований можно представить временную диаграмму обслуживания, показанную на рис. 1.4.



ω – среднее время ожидания;

V – средняя длительность заявки.

Рис. 1.4 – Временная диаграмма обслуживания для бесприоритетных дисциплин

Также возможно применение смешанных дисциплин обслуживания. На рис. 1.5 представлена смешанная дисциплина RR+FB.

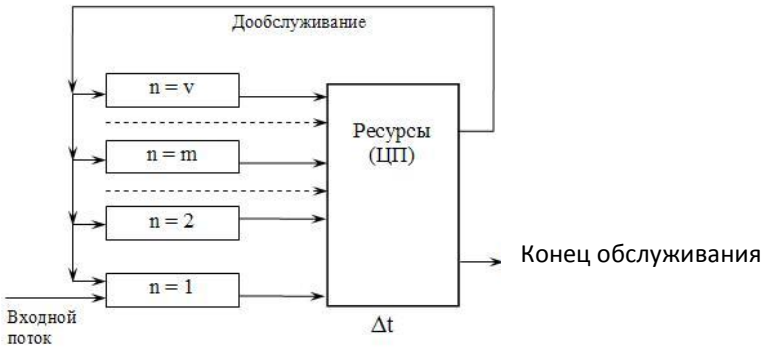


Рис. 1.5 – Смешанная дисциплина обслуживания RR+FB

Каждая заявка в n-ой очереди проходит несколько кругов и только потом попадает в очередь следующего уровня. К достоинствам такого алгоритма действий можно отнести снижение расходов на перевод в другую очередь, а также возможность подбора параметров под традиционный поток требований [46, 81, 141].

Анализируя бесприоритетные дисциплины обслуживания можно сделать выводы:

1. Линейные дисциплины характеризуются одинаковым средним временем ожидания.

2. Циклические дисциплины могут обслуживать короткие заявки с неявным приоритетом.

3. Для работы бесприоритетных дисциплин обслуживания не требуется предварительная информация о длительности обслуживания требований.

Приоритетные дисциплины обслуживания (ПДО) очереди требований основываются на учете важности обслуживания требований. Главный принцип ПДО – наивысший приоритет – первым [85].

ПДО характеризуются сложной, по сравнению с бесприоритетными дисциплинами, работой с очередь. ПДО подразумевают формирование очереди, а затем выбор требований по критериям. Очередь в дисциплине можно классифицировать:

- упорядоченная
    - формирование-перебор
    - обслуживание-первая заявка из очереди
- частично упорядоченная
    - формирование – первая
    - обслуживание – первая
- неупорядоченная
    - формирование – добавить в конец
    - обслуживание – поиск

В упорядоченной очереди требования размещаются в соответствии с приоритетом. В частично упорядоченной очереди с периодичностью T происходит упорядочивание очереди. В неупорядоченную очередь требования размещаются по порядку поступления, но для выбора приоритетного требования требуется время [130].

Назначение приоритета требованиям происходит на основе их характеристик. Некоторые из характеристик, влияющих на приоритет:

- время обслуживания;
- приоритет, назначенный вне системы;
- время присутствия в обслуживающей системе;
- тип требования.

ПДО могут основываться на фиксированном или динамическом приоритете. В первую очередь рассматриваются ПДО с фиксированным приоритетом [11, 15].

Если выполнение обслуживания требования не прерывается с моментом поступления более приоритетного требования, то это ДО с относительным приоритетом. На рис. 1.6 представлена схема работы ДО с относительным приоритетом.

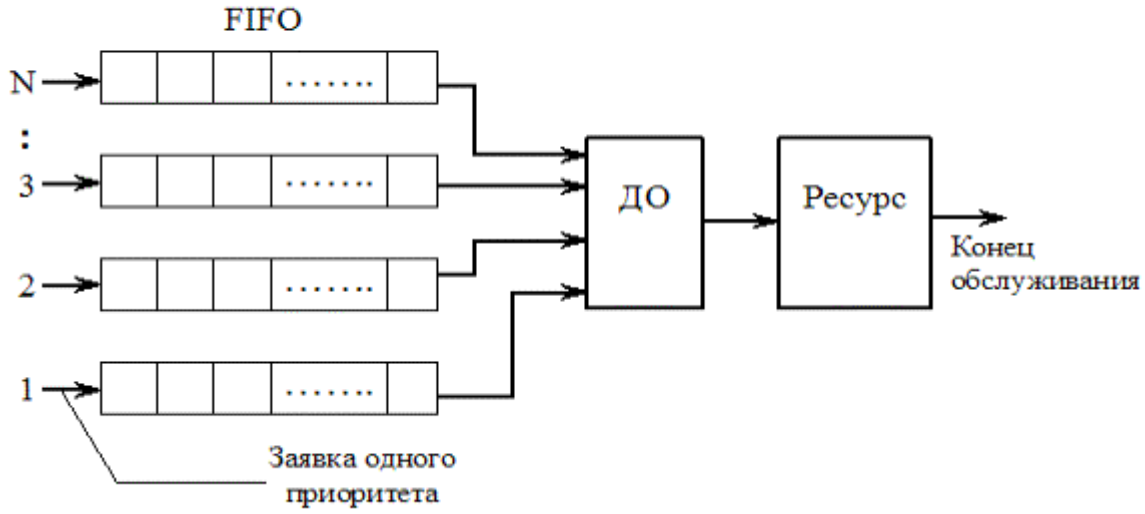


Рис. 1.6 – ДО с относительным приоритетом

В случае поступления нескольких заявок с одинаковым приоритетом они обслуживаются по принципу FIFO [118].

Если в обслуживающей системе требование, поступившее с более высоким приоритетом чем то, которое находится на обслуживании, может прервать процесс обслуживания, то это ДО с абсолютным приоритетом. Схема ДО с абсолютным приоритетом изображена на рис. 1.7.

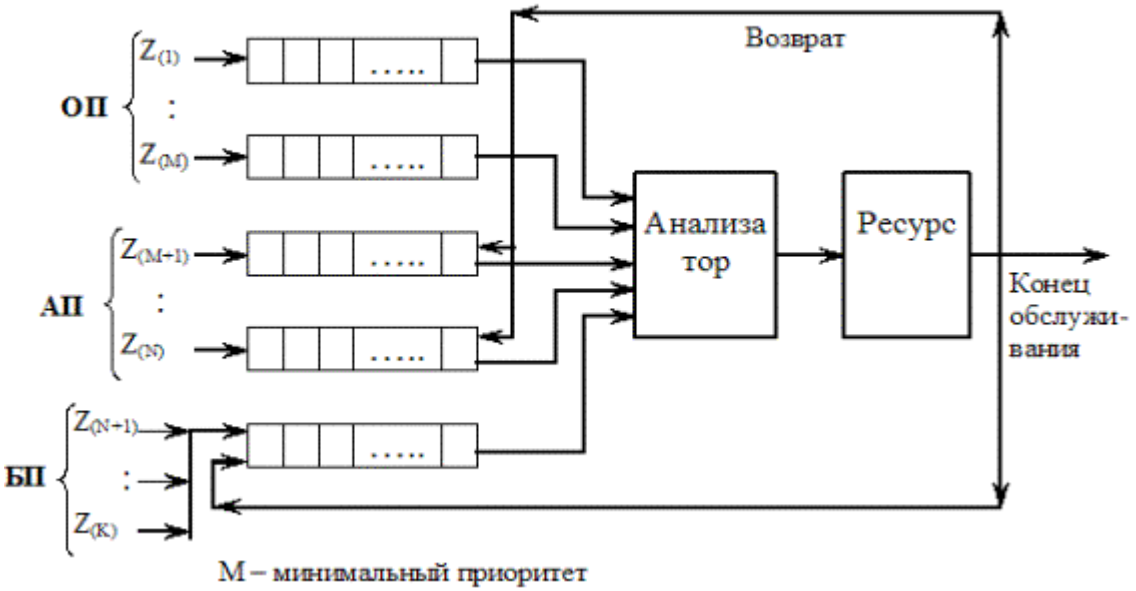


Рис. 1.7 – Схема работы ДО с абсолютным приоритетом

На основании алгоритмов работы ПДО можно составить диаграмму качества обслуживания, представленную на рис. 1.8.

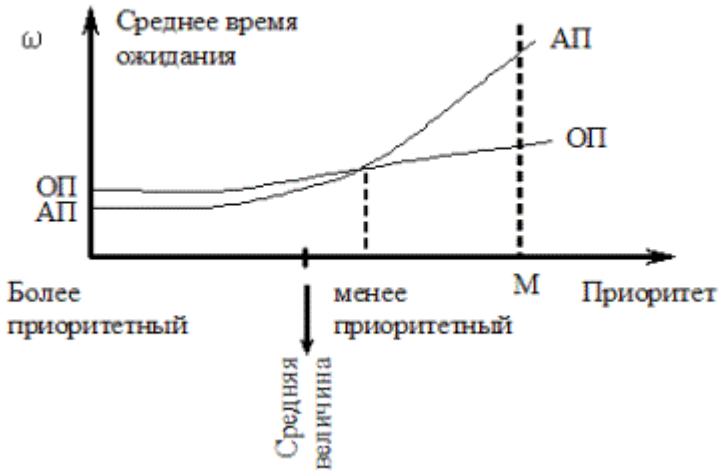


Рис. 1.8 – Диаграмма качества обслуживания ПДО

Также возможен вариант смешанного типа для ПДО, изображенный на рис. 1.9. В этом случае различным группам требований присваивается различный приоритет. Такой подход используется, когда ни одна из частных дисциплин не удовлетворяет заданным ограничениям [36, 39, 135].

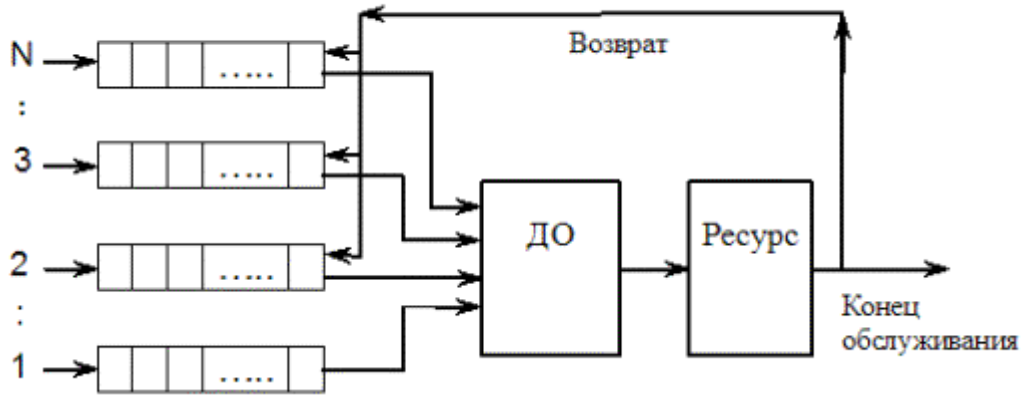


Рис 1.9 – Смешанный вариант ПДО

В СМО возможно применение адаптивных ДО. В таких дисциплинах возможен как абсолютный, так и относительный приоритет. Для определения выбора абсолютного или относительного приоритета определяется условная «стоимость» прерывания. Если прервать будет дороже – то относительный приоритет, иначе абсолютный [76, 140].

В ПДО есть ряд недостатков:

- неточность характеристик зачастую приводит к приблизительности приоритета;
- если внешний пользователь системы знает о системе приоритета, то возможна «приспосабливаемость» требований;
- отдельные заявки в системе с низким приоритетом могут находится длительное время в системе;
- нет возможности подстройки ДО к изменяющимся характеристикам входного потока.

Если в ДО приоритет требования может изменяться с течением времени, то это дисциплина с динамическим приоритетом. Одним из критериев повышения приоритета может выступать длительность ожидания обслуживания. В этом

случае, через какой-то промежуток времени приоритет заявки, которая дольше всех находится в ожидании повышается [10]. Временная диаграмма изменения приоритета показана на рис. 1.10.

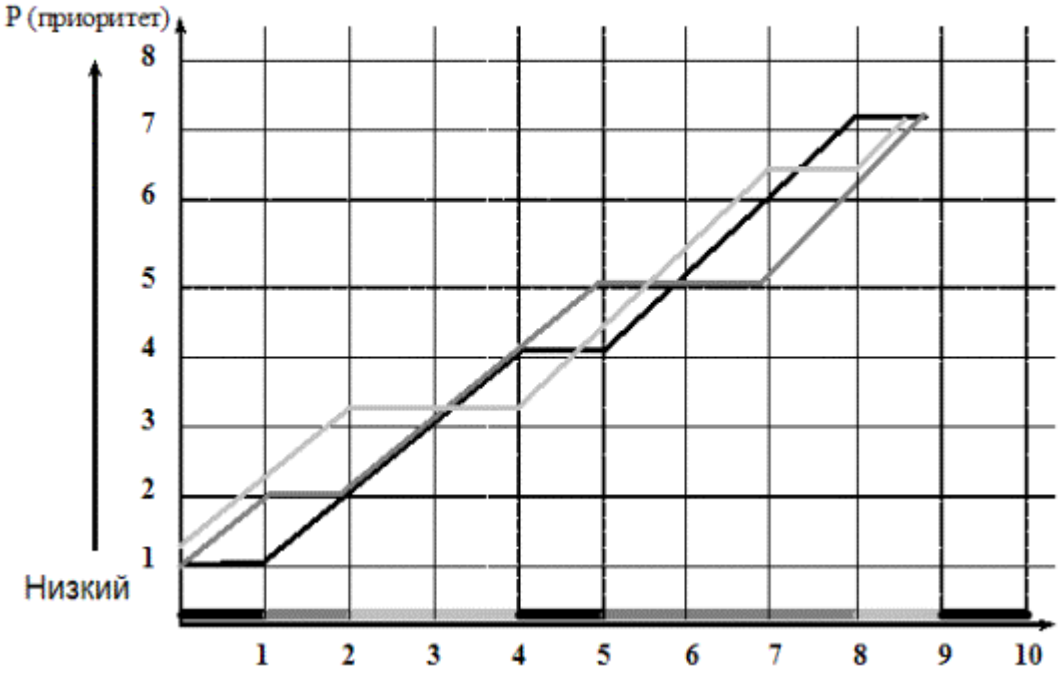


Рис. 1.10 – Диаграмма изменения приоритета во времени

К достоинствам такой ДО можно отнести:

- возможность подстройки ДО при изменении характеристик входных требований;
- возможность регулирования приоритета во время нахождения требования в очереди;
- ДО основана на реальных показателях.

Однако такая ДО обладает существенным недостатком – сложностью реализации [13, 121].

Таким образом, рассмотрены все основные ДО очереди требований, применяемые в обслуживающих системах.

Анализ существующих дисциплин обслуживания очереди требований показал, что для системы, в которой участвует человек ни одна из них не подходит. Поэтому решено разрабатывать дисциплину обслуживания очереди,

основанную на аппарате нечеткой логики. Схема обслуживающей системы и блок дисциплины обслуживания очереди показаны на рис. 1.11.

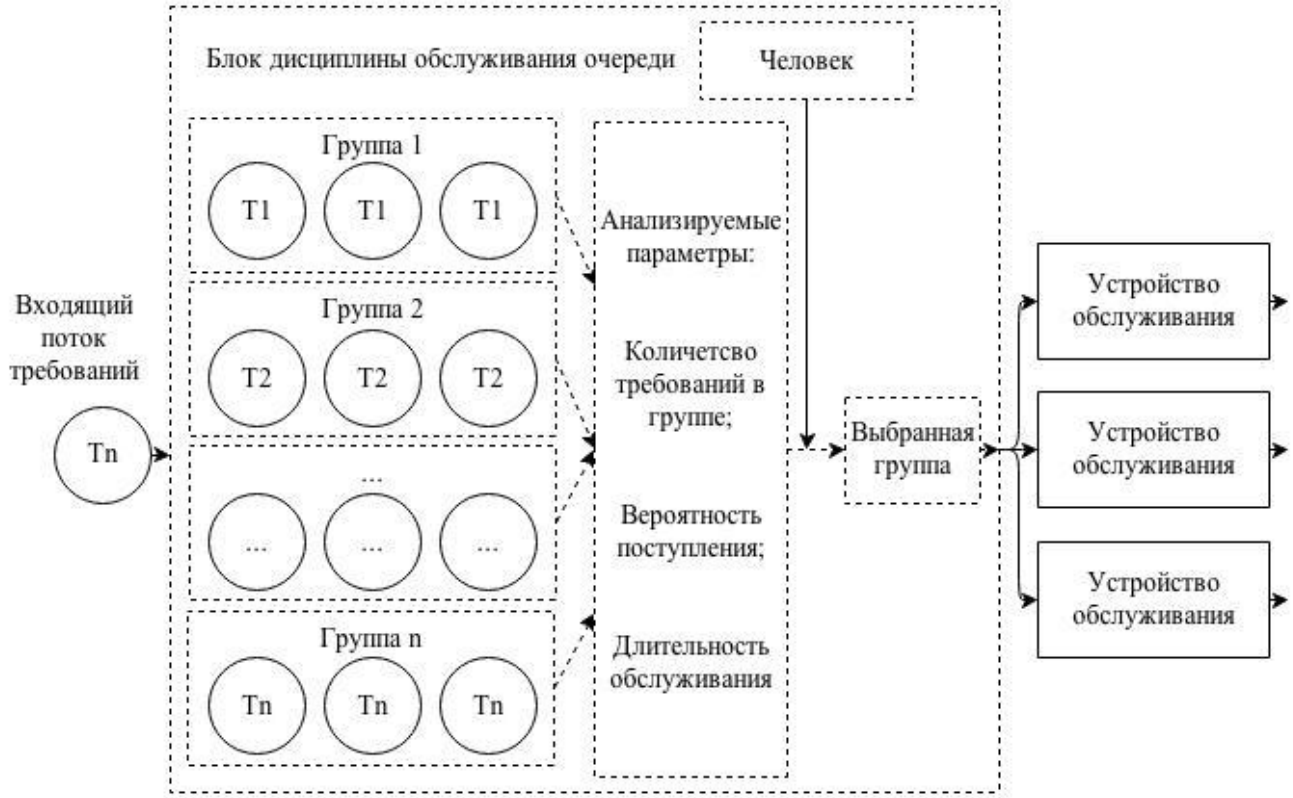


Рис. 1.11 – Дисциплина обслуживания очереди рассматриваемой СМО

1.3 Программные комплексы имитационного моделирования обслуживающих систем

Для создания компьютерных имитационных моделей обслуживающих систем существует 2 способа:

1. С использованием комплексов имитационного моделирования.
2. С применением универсальных языков программирования.

Использование комплексов имитационного моделирования для исследования объектов дает ряд преимуществ перед использованием универсального языка программирования:

- Комплексы имитационного моделирования содержат большинство требуемых функций для создания моделей, что позволяет значительно сэкономить время и средства;
- Моделирующие конструкции комплексов имитационного моделирования адаптированы для создания имитационных моделей, в отличии от конструкций универсальных языков программирования;
- Имитационные модели, созданные в программных комплексах, проще редактировать и анализировать;
- Комплекс имитационного моделирования автоматически определяет ошибки во время создания модели.

Однако универсальные языки программирования также имеют свои преимущества перед комплексами имитационного моделирования:

- Имитационные прогоны выполняются быстрей в моделях, написанных на универсальных языках программирования. Это объясняется тем, что комплекс имитационного моделирования содержит множество объектов, которые не всегда используются;
- Универсальные языки программирования распространены во всех сферах компьютерной деятельности, поэтому разработчика со знанием комплексов имитационного моделирования найти сложней;

- Универсальные языки программирования обеспечивают большую гибкость ввиду того, что не имеют никаких ограничений по создаваемым моделям;
- Стоимость среды программирования зачастую ниже стоимости комплекса имитационного моделирования.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что оба способа создания имитационных моделей имеют свои преимущества и недостатки. Однако освоение комплекса имитационного моделирования занимает меньше времени, чем освоение универсального языка программирования. А также создание моделей происходит быстрее в комплексе имитационного моделирования, что в условиях современной конкуренции позволяет оперативно принимать решения на основе созданных моделей. Поэтому актуальной задачей является разработка комплекса имитационного моделирования, который позволит учитывать такие особенности исследуемых объектов как нечеткость дисциплины обслуживания очереди [44, 114, 115].

Программный комплекс имитационного моделирования должен реализовывать следующие возможности для создания дискретно событийных моделей:

- Продвижение времени моделирования;
- Добавление и удалений записей в списки и таблицы;
- Генерирование случайных значений с заданным вероятностным распределением;
- Сбор и анализ выходных статистических данных;
- Генерация отчетов;
- Определение ошибок и сбоев.

Существует два основных типа комплексов для создания имитационных моделей: предметно-ориентированные комплексы моделирования и языки для создания имитационных моделей.

Языки для создания имитационных моделей универсальны и представляют возможности для создания моделей любой сложности. Создание модели

подразумевает написание программного кода, описывающего события имитационной модели [62].

Другой вид комплексов имитационного моделирования представляет собой комплекс имитационного моделирования с графическими объектами, пользовательским интерфейсом и встроенными функциями и конструкциями моделирования. Программные комплексы имитационного моделирования проще в изучении и освоении, но не всегда обладают достаточной гибкостью при создании имитационных моделей [127, 128].

Объединение достоинств обоих методов привело к созданию комплексов имитационного моделирования, сочетающих графическое создание модели и возможность программирования сложных участков модели. В таких комплексах имитационная модель создается путем добавления значков объектов в рабочую область. Объекты в модели, в свою очередь, имитируют поведение реальных объектов. Затем добавленные имитации объектов соединяются посредством специальных связей. Также возможно изменить свойства объекта. В местах имитационной модели, где недостаточно функционала программного средства, добавляется программный код, обеспечивающий правильную работу модели. Программный код, как правило, пишется на встроенном языке программирования комплекса имитационного моделирования [58].

По назначению можно разделить комплексы имитационного моделирования на два типа:

1. Предметно-ориентированные комплексы имитационного моделирования. Предназначены для конкретных предметных областей. Они обладают набором функций, позволяющих смоделировать возможные вариации одной системы, однако функционал может быть недостаточным для создания модели из другой предметной области.

2. Универсальные комплексы имитационного моделирования. Предназначены для решения широкого круга задач. Позволяют создавать имитационные модели из разных предметных областей. Также могут содержать функции, адаптированные для решения конкретных задач. Для случаев, когда

невозможно создать имитационную модель объекта, используется встроенный язык программирования.

В программных комплексах могут быть реализованы различные подходы к моделированию. Два основных подхода представляют собой дискретно-событийное и непрерывное имитационное моделирование [88, 125].

Дискретно-событийное моделирование применяется для имитации взаимодействий компонентов системы и исследования возможностей системы. В дискретно-событийном моделировании определяются все возможные состояния системы и описываются факторы, влияющие на переход из одного состояния в другое. В таком случае имитация представляет собой динамически изменяемые во времени состояния системы.

При дискретно-событийном моделировании состояние системы может изменяться только в момент совершения события. При этом между этими моментами состояние системы остается неизменным.

Наиболее распространенным способом продвижения времени в дискретно-событийном моделировании является механизм, основанный на алгоритме поиска ближайшего события [68, 71].

Непрерывное имитационное моделирование реализуется путем применения непрерывно изменяющихся зависимых значений или переменных. Непрерывно изменяющиеся переменные можно назвать переменными состояния. Непрерывное имитационное моделирование основано на задании уравнений для совокупностей переменных состояния. Динамическое изменение этих переменных имитирует работу реальной системы.

Зачастую моделирование непрерывных систем определяется в терминологии производных переменных состояния. Это можно объяснить тем, что зачастую проще записать выражение для расчета скорости изменения переменной состояния, чем задать выражение для самой переменной. Например, в ходе разработки имитационной модели составлено дифференциальное уравнении для переменной состояния S по переменной времени t:

$$\frac{ds(t)}{dt} = S^2(t) + t^2$$

$$S(0) = k$$

Второе уравнение описывает начальное условие переменной состояния. Первое уравнение описывает скорость изменения переменной *S* от *S* и *t*. Целью имитационного эксперимента выступает определение реакции переменной состояния в зависимости от продвижения имитационного времени [8].

Комплексы имитационного моделирования включают в себя свойства, ресурсы, объекты и очереди как часть структуры создаваемой имитационной модели. В любой моделируемой системе имитация объекта создается, перемещается по заданному пути и, как правило, затем удаляется из модели. Каждый объект наделен определенными свойствами, которые хранятся как информация об объекте. Для продвижения имитации объекта по модели требуются определенные ресурсы и устройства для обслуживания этого объекта. Если ресурсы или устройства не доступны, то объект помещается в очередь. Очередь подчиняется определенным правилам обслуживания [134, 137, 143].

Перед тем, как выбрать комплекс имитационного моделирования для решения поставленной задачи, следует учесть все возможности, которые он предоставляет. Эти возможности можно объединить в несколько групп:

- Совместимость комплекса имитационного моделирования с оборудованием и программным обеспечением;
- Характеристики комплекса;
- Средства для обработки выходных данных;
- Возможности генерации отчетов;
- Возможно визуализации работы имитационной модели;

В первую очередь, при выборе программного комплекса имитационного моделирования следует обращать внимание на совместимость оборудования и программного обеспечения. Если требования программного комплекса будут выше, чем доступное оборудование, то могут возникнуть проблемы при запуске

имитационных прогонов. На неподходящем оборудовании резко возрастет время проведения имитационных прогонов и экспериментов [16, 95, 126].

Второй пункт совместимости – программное обеспечение определяет возможность установки программного комплекса имитационного моделирования на имеющуюся операционную систему. Если программный комплекс имитационного моделирования является кроссплатформенным, то никаких проблем с его установкой и использованием не возникнет на любой операционной системе. Однако, если программный комплекс разработан для конкретного семейства операционных систем или для конкретной версии операционной системы, то его использование будет ограничено.

Таким образом, выбирая программный комплекс имитационного моделирования, необходимо учесть возможность совместимости с установленной операционной системой, а также следует обратить внимание на требования к аппаратному обеспечению [43].

Характеристики комплекса также определяют возможности его применения. Одним из важнейших свойств является гибкость при создании имитационных моделей, то есть возможность моделирования систем с различным уровнем сложности и детализации. Ввиду особенностей реальных систем, программные комплексы с ограниченным числом моделирующих конструкций окажутся непригодными для создания большого количества моделей. Поэтому комплексы с встроенным языком программирования всегда обладают большей гибкостью. Дополнительную гибкость программному комплексу имитационного моделирования может придать возможность подключения внешних модулей, написанных на языках универсального программирования.

Существует ряд возможностей, придающих гибкость программному комплексу имитационного моделирования:

- Определение и изменение свойств объектов и глобальных переменных. Применение и тех и других в логических связях посредством программных модулей;
- Возможность применения математических функций и выражений;

- Возможность управлять моделирующими конструкциями, как посредством изменения свойств объектов, так и посредством написания программного кода.

Одним из важнейших свойств программных комплексов имитационного моделирования является простота в применении и изучении. Именно поэтому большинство современных пакетов моделирования имеют графический интерфейс. Для систем моделирования с графическим интерфейсом характерно наличие множества встроенных объектов для возможности моделирования сложных систем. Также каждый объект, в свою очередь, должен быть наделен свойствами для повышения гибкости создаваемой модели [78, 116, 117].

Помимо простоты использования, программный комплекс имитационного моделирования должен обеспечивать простоту понимания созданных моделей. Ввиду того, что пользователь и разработчик имитационной модели могут быть разными людьми, то необходимо обеспечить понятный ввод входных данных. Также необходима возможность создания справочного материала.

Полезным свойством, реализуемым комплексами имитационного моделирования, выступает возможность создания иерархии объектов. Иерархическая структура имитационной модели упрощает использование однотипных элементов и увеличивает скорость разработки моделей. Еще одно полезное свойство иерархии – упорядочивание данных в модели. Помимо этого, элементы модели, объединенные в иерархические структуры, можно использовать при создании других моделей [91].

Наличие встроенного отладчика в программном комплексе имитационного моделирования значительно сокращает время на отладку имитационной модели. Мощный отладчик может устранить большую часть ошибок еще до начала тестирования модели.

Комплекс имитационного моделирования, поддерживающий вывод графических данных, позволяет визуально оценить созданную модель. Вывод графиков загрузки устройств или цикловых графиков являются полезными

дополнительными функциями, обеспечивающими простоту анализа моделируемой системы.

Важным параметром работы пакета имитационного моделирования выступает скорость выполнения имитационных прогонов. Различные программные продукты могут показывает сильно отличающиеся результаты для одной и той же имитационной модели. В таком случае необходимо выбирать программное обеспечение, которое в больше степени адаптировано к решению необходимого класса задач.

Хороший программный комплекс имитационного моделирования должен уметь вести работу с внешними данными. В первую очередь этой связано с необходимостью использования баз данных. В случае если невозможно подключить базу данных к создаваемой модели, то может потребоваться значительное время для переноса необходимых данных. Помимо этого может потребоваться функция экспорта данных. Прежде всего, это связано с генерацией отчетов, а также выводом статистических данных [102, 104].

Еще одним аспектом работы с внешними данными является необходимость подключения внешних модулей. Иногда внешний модуль, написанный на универсальном языке программирования, может справиться с поставленной задачей значительно быстрей, чем встроенный инструмент того же назначения.

Зачастую немаловажной особенностью выступает анимация имитационной модели. В пакетах имитационного моделирования анимация реализуется посредством изменения объектов и их внешнего вида. В современных программах имитационного моделирования также стала доступна 3-d анимация. Ее применение позволяет фактически полностью смоделировать реальную систему.

Для выбора комплекса имитационного моделирования необходимо проанализировать их достоинства и недостатки. Также необходимо оценить пакет имитационного моделирования по приведенным выше критериям.

Программный комплекс имитационного моделирования Arena компании Rockwell Automation является одним из лидеров на рынке пакетов имитационного моделирования. В пакете Arena применяется язык имитационного моделирования

SIMAN, а также процессор SIMAN. Области применения программного комплекса имитационного моделирования Arena: производственные процессы, складские системы и логистика, управление персоналом и т.д.

Arena представляется собой комплекс имитационного моделирования с графическим интерфейсом. В программе уже содержится набор шаблонов, для реализации моделирующих конструкций. Добавленные в рабочую область моделирующие конструкции уточняются с помощью таблиц и диалоговых окон. Для повышения гибкости модели и упрощения моделирования применяется иерархическая структура. Установка Arena возможна только на операционные системы Windows. Также предусмотрена передача данных из Microsoft Excel и Microsoft Access.

Многие крупные компании остановили свой выбор на таком пакете имитационного моделирования, как AnyLogic. AnyLogic – это программный продукт, предназначенный для создания имитационных моделей сложных процессов, объектов и систем. Данный программный продукт разработан российской компанией XJ Technologies. AnyLogic поддерживает три метода имитационного моделирования: системная динамика, агентное моделирование, дискретно-событийное моделирование.

AnyLogic снабжен графическим интерфейсом. Основные моделирующие конструкции разделены по палитрам. Детализация основных моделирующих конструкций происходит аналогично Arena – с использованием таблиц и диалоговых окон.

Tecnomatix Plant Simulation представляет собой инструмент дискретного моделирования, который помогает создавать цифровые модели производства для определения характеристик системы и оптимизации ее производительности. Созданные цифровые модели позволяют проводить эксперименты и прорабатывать возможные сценарии без вмешательства в работу существующих производственных систем или (при использовании в процессе планирования) задолго до внедрения реальных систем. Обширный набор инструментов анализа (анализ узких мест, статистические данные и графики) помогает оценить

различные сценарии производства. Полученная в результате этого информация необходима для быстрого принятия верных решений на ранних стадиях планирования производства.

Plant Simulation позволяет создавать модели любого уровня сложности. В Plant Simulation модель создается объектами, которые подразделяются на несколько разновидностей:

- passive material flow objects – объекты, которые не участвуют в активных частях процесса, но являются основой моделей;

- mobile Objects (MUs) – объекты, которые создаются, хранятся, транспортируются, обрабатываются и удаляются из модели;

- resource Objects – объекты, которые позволяют управлять рабочими в модели;

- information flow objects – объекты, которые позволяют управлять запросами, сортировкой, переменными значениями.

Учитывая все вышеперечисленные характеристики и особенности был проведен анализ современных комплексов имитационного моделирования. Ввиду распространенности и разнообразия пакетов, решено модернизировать один из них под решаемые задачи. Для модификации выбран комплекс имитационного моделирования компании Siemens - Tecnomatix Plant Simulation. Такой выбор обславливается широкоми возможностями моделирования и наличием множества модулей, реализующих различные моделирующие конструкции для большинства объектов. Еще одна важная причина выбора Tecnomatix Plant Simulation – возможность адаптации этого программного средства под различные задачи с использованием API интерфейса. Это особенно важно ввиду того, что в работе рассматриваются объекты, которые невозможно смоделировать стандартными средствами программного комплекса.

1.4 Цель работы и задачи исследования

Анализ вышеописанных положений позволил сделать выводы о рациональности их применения и об использовании их совместно или по отдельности. Такой анализ помогает определить нерешенные задачи в исследуемой области и недостаточно проработанные проблемы.

В настоящее время возникает необходимость исследования все новых типов обслуживающих систем. При этом постоянно остается актуальной скорость исследования этих систем. Дополнительную сложность в исследование вносит человеческий фактор. Системы, в которых решающую роль играет человек, невозможно описать четкими логическими рассуждениями, поэтому возникает необходимость применения нечеткой логики.

Анализ пакетов имитационного моделирования выявил невозможность их применения для исследования класса объектов, отличающихся нечеткостью. В связи с этим возникает необходимость модификации программного комплекса, который будет предоставлять возможности моделирования, учитывающие нечеткость системы.

Целью данной диссертационной работы является разработка методов и средств исследования систем массового обслуживания с нечеткими правилами формирования дисциплины очереди, обеспечивающих высокую точность результата, на основе аппарата нечеткой логики и уравнений баланса.

Для достижения поставленной цели сформированы задачи:

- Разработка дисциплины обслуживания очереди требований для систем, отличающихся нечеткостью правил формирования очереди требований;
- Разработка численного метода расчета количества устройств обслуживания в системах с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди;
- Постановка оптимизационной задачи определения количества устройств обслуживания в условиях нечетких правил формирования очереди;

- Модификация программного комплекса имитационного моделирования, с целью добавления возможностей исследования СМО с нечеткими правилами дисциплины очереди;
- Практическая апробация разработанных методов и алгоритмов применительно к задаче идентификации параметров обслуживающей системы с нечеткими правилами дисциплины очереди в реальных условиях.

2.Разработка дисциплины обслуживания очереди для СМО с нечеткими правилами

Глава посвящена разработке дисциплины обслуживания очереди с нечеткими правилами.

В начале главы рассмотрены особенности исследуемой многофазной многоканальной СМО. Приведены характеристики требований, которые учитываются при разработке дисциплины обслуживания. На основе изложенных сведений решено использовать аппарат нечеткой логики.

Во второй части главы описывается процесс разработки дисциплины обслуживания на основе аппарата нечеткой логики. Описаны процесс фаззификации, нечеткий логический вывод и процесс деффазификации.

На основе разработанной дисциплины обслуживания очереди составлен алгоритм определения группы требования для обслуживания.

2.1 СМО с нечеткими правилами дисциплины очереди

Как было определено в первой главе, предметом исследования является многоканальная многофазная обслуживающая система. Рассматриваемая система характеризуется специфическими особенностями, касающимися дисциплины обслуживания и параметров загрузки устройств.

Дисциплина обслуживания требований в рассматриваемой СМО подчиняется определенным правилам. Эти правила основываются на характеристиках поступающих требований.

Входящие требования разделены на одинаковые типы. Устройства обслуживания могут обрабатывать одновременно группы требований. Будет ли группа принята на обслуживание зависит от следующих параметров:

- количество требований из группы в очереди;
- вероятность поступления требования из группы;
- время обслуживания группы требований.

При этом каждый из параметров по разному влияет на принятие решения:

- Чем больше требований из одной группы в очереди, тем выше вероятность обслуживания этой группы.
- Чем выше вероятность поступления требования из группы, тем ниже вероятность обслуживания этой группы. Это связано с тем, что в скором времени будет возможно обслужить одновременно больше требований.
- Чем выше длительность обслуживания, тем ниже вероятность поступления группы на обслуживание.

Окончательное решение о поступление группы на обслуживание принимается человеком – оператором устройства. Учитывая человеческий фактор невозможно составить четкую схему определения группы для обслуживания. Поэтому для разработки дисциплины обслуживания очереди решено использовать аппарат нечеткой логики.

Нечеткая логика представляет собой удобный способ построения систем управления сложными технологическими процессами, а также любых других экспертных систем. Несмотря на то, что математический аппарат нечеткой логики впервые был разработан в США, активное развитие данного метода началось в Японии, и новая волна вновь достигла США и Европы [7, 28].

Нечеткая логика появилась в 1965 в работах Лотфи А. Задэ, профессора технических наук Калифорнийского университета в Беркли.

Нечеткая логика основана на использовании таких оборотов естественного языка, как «далеко», «близко», «холодно», «горячо». Многие современные задачи управления просто не могут быть решены классическими методами из-за очень большой сложности математических моделей, их описывающих. Вместе с тем, чтобы использовать теорию нечеткости на цифровых компьютерах, необходимы математические преобразования, позволяющие перейти от лингвистических переменных к их числовым аналогам в ЭВМ [48].

2.2 Дисциплина обслуживания очереди на основе аппарата нечеткой логики

На вход обслуживающей системы поступают требования с распределением по закону Пуассона. Таким образом, за время t в систему поступит λt требований. Все требования разделены на группы по общим признакам. Количество групп требований определяется параметрами конкретной рассматриваемой системы

Поступающие в систему обслуживания требования можно обозначить как $T_1, T_2, \ldots, T_n$, где n – номер группы.

Первым этапом в работе дисциплины обслуживания очереди является определение количества групп, которые будут выбраны для обслуживания. Количество групп для обслуживания выбирается в зависимости от количества свободных устройств обслуживания. В случае если в момент предполагаемой загрузки, ни одно из устройств не свободно, то загрузка откладывается до освобождения как минимум одного устройства.

Сначала можно определить вероятность того, что все устройства заняты, или того, что все устройства обслуживания свободны. Затем, если есть свободные устройства, определить их количество. В работе рассмотрены обе возможности.

Необходимо получить исходные данные для определения количества свободных устройств. Исходные данные должны содержать:

- интенсивность поступления требований;
- среднее время обслуживания требований;
- количество устройств обслуживания с нечеткими правилами формирования дисциплины очереди

Найти вероятность того, что все устройства обслуживания свободны, можно по известной формуле:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{m-1} \frac{(\lambda \bar{t})^k}{k!} + \frac{(\lambda \bar{t})^m}{(m-1)!(m-\lambda \bar{t})}}, \qquad (2.1)$$

где λ - интенсивность поступления требований, t - среднее время обслуживания, m – количество устройств обслуживания [97, 119].

Второй способ определения того, следует ли применять дисциплину обслуживания очереди для устройств с нечеткими правилами, является определение вероятности, что все устройства заняты.

Занятость всех устройств можно определить по известной формуле:

$$\pi = \frac{(\lambda \bar{t})^m P_0}{(m-1)!(m-\lambda \bar{t})}, \text{ при } \frac{\lambda \bar{t}}{m} < 1, \qquad (2.2)$$

где P_0 – вероятность, что все устройства свободны.

Определив вероятность наличия свободных устройств по формуле (2.1) или (2.2) необходимо определить среднее количество свободных устройств [98].

Определить среднее количество устройств, свободных от требований можно по известной формуле:

$$N_{cd} = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{m-k}{k!} (\lambda \bar{t})^k P_0, \qquad (2.3)$$

Таким образом, необходимо рассмотреть все группы требований, находящиеся в очереди, и определить N_{cd} наиболее подходящих групп.

Для выбора групп требований, которые поступят на обслуживание, разработана дисциплина обслуживания очереди на основе нечетких правил.

Необходимо выделить параметры, отвечающие за прием группы требований на обслуживание.

Первым параметром выступает фактическое количество требований из группы, которое находится в очереди устройства. Это самый значимый параметр при принятии решения.

Вторым параметром выступает вероятность поступления требования из рассматриваемой группы. Учитывая, что требования в систему поступают согласно пуассоновскому распределению, можно записать плотность распределения:

$$p(x) = \begin{cases} 0, x < 0 \\ \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0 \end{cases}$$

При этом вероятность поступления требования:

$$p_i(x) = \frac{(\lambda t)^2}{i!} e^{-\lambda t}, i \geq 0$$

Третий параметр, который отвечает за прием группы требований на обслуживание – время обслуживания. Время обслуживания представляет собой трудоемкость для группы требований. При этом не имеет значения сколько на данный момент в группе требований. Для любого количества требований *n*, которое не превышает допустимое количество требований в устройстве, время обслуживания группы будет постоянным [92, 129].

Необходимо учитывать также тот факт, что окончательное решение о приеме группы требований на обслуживание принимает человек.

Таким образом, выделены параметры, отвечающие за прием группы деталей на обслуживание, и представлены в виде лингвистических переменных:

1. *P1*. Количество требований из рассматриваемой группы в очереди.
2. *P2*. Вероятность поступления требования из группы.
3. *P3*. Время обслуживания группы.

Выбор количества лингвистических значений для переменных сделан исходя из факта принятия решения человеком. Чем ниже количество лингвистических значений, тем быстрей и проще человеку определить принадлежность лингвистической переменной. Минимально возможно определить 3 лингвистических значения для переменных.

Возможно определить большее количество лингвистических значений для переменных. В этом случае повысится «правильность» выбора группы. Однако разработанная дисциплина очереди адаптирована, прежде всего, для применения в реальных условиях [4].

Разработан блок фаззификации входных параметров. Для определения меры соответствия лингвистических переменных лингвистическим значениям в работе используются функции принадлежности гауссова типа, имеющие вид:

$$\mu(x) = \exp[-(\frac{x-c}{\delta})^2], \qquad (2.4)$$

где c – центр нечеткого множества, δ - определяет крутизну функции.

Функции принадлежности для каждой лингвистической переменной определяются отдельно от остальных.

Для лингвистической переменной P1 в качестве области рассуждений выбран диапазон $X=[0,\ N_{im}]$, где N – количество требований в группе, i – номер группы требований, а m – номер устройства обслуживания. Выбор диапазона сделан на основании того, что в очереди к устройству одновременно может находиться вся группа [51].

Согласно выбранному количеству значений, необходимо определить по 3 значения для лингвистических переменных. Для переменной P1 определены следующие лингвистические значения:

- «мало требований из группы в очереди»;
- «приблизительно половина группы»;
- «много требований из группы в очереди».

Каждому из лингвистических значений соответствует нечеткое множество A_i^k, где i – номер группы требований, k обозначает одно из лингвистических значений, $k=\{1,2,3\}$. $k=1$ соответствует лингвистическому значению «мало требований из группы в очереди», $k=2$ соответствует лингвистическому значению «приблизительно половина группы», $k=3$ соответствует лингвистическому значению «много требований из группы в очереди».

Для каждого нечеткого множества задана функция принадлежности гауссова типа (2.4), приписывающая каждому элементу из диапазона $X=[0,\ N_{im}]$, степень его принадлежности к нечеткому множеству A_i^k.

Функция принадлежности для нечеткого множества A_i^1:

$$\mu_{A_i^1}(x_i) = \exp[-(\frac{x_i - 0}{30})^2], \qquad (2.5)$$

где x – значение из множества X. Параметр δ, определяющий крутизну функции, определен опытным путем.

Функция принадлежности для нечеткого множества A_i^2:

$$\mu_{A_i^1}(x_i) = \exp[-(\frac{x_i - N_{im}/2}{30})^2]. \qquad (2.6)$$

Функция принадлежности для нечеткого множества A_i^3:

$$\mu_{A_i^1}(x_i) = \exp[-(\frac{x_i - N_{im}}{30})^2]. \qquad (2.7)$$

Построены графики функций принадлежности, изображенные на рисунке 2.1.

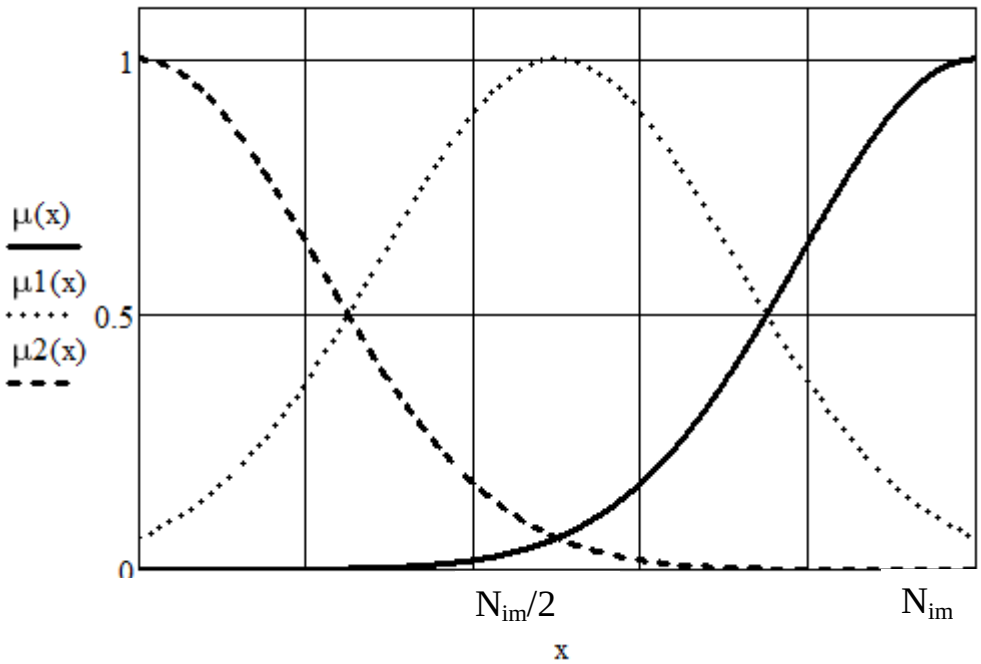


Рис. 2.1 – Графики функций принадлежности

В результате, получены нечеткие множества $\overline{A}_i^k$, определяющие степень соответствия исходного показателя каждому из лингвистических значений [75].

Аналогично необходимо определить функции принадлежности оставшимся двум переменным.

В качестве области рассуждений для переменной P2 выбран диапазон *Y=[0,100]*. Выбор диапазона объясняется тем, что максимально возможная вероятность поступления требования из группы в очередь равна 100%.

Необходимо определить 3 значения для лингвистической переменной. Каждое значение будет определять приблизительную вероятность поступления требования из рассматриваемой группы:

- «высокая вероятность поступления»;
- «средняя вероятность поступления»;
- «низкая вероятность поступления».

Каждой из формулировок соответствует нечеткое множество B_i^k, где i – номер группы требований, k обозначает одно из лингвистических значений, *k={1,2,3}*. *k=1* соответствует лингвистическому значению «низкая вероятность поступления», *k=2* соответствует лингвистическому значению «средняя вероятность поступления», *k=3* соответствует лингвистическому значению «высокая вероятность поступления».

Каждому нечеткому множеству соответствует функция принадлежности гауссова типа (2.4). Функция принадлежности определяет степень соответствия входных значений нечеткому множеству *Y=[0,100]*. Необходимо определить значения параметра c – центра нечеткого множества. Ввиду того, что выбрано 3 лингвистических значения, параметры c^k для функций принадлежности заданы следующим образом:

$$\mu_{B_i^1}(y_i): c^1=0,$$

$$\mu_{B_i^2}(y_i): c^2=50,$$

$$\mu_{B_i^3}(y_i) : c^3=100,$$

где *y* – элемент множества *Y=[0,100]*.

Параметр δ, определяющий крутизну функции, выбран опытным путем, и его значение равно 30. Функция принадлежности для нечеткого множества B_i^1:

$$\mu_{B_i^1}(y_i) = \exp[-(\frac{y_i - 0}{30})^2], \quad (2.8)$$

Функция принадлежности для нечеткого множества B_i^2:

$$\mu_{B_i^1}(y_i) = \exp[-(\frac{y_i - 50}{30})^2]. \quad (2.9)$$

Функция принадлежности для нечеткого множества B_i^3:

$$\mu_{B_i^1}(y_i) = \exp[-(\frac{y_i - 100}{30})^2]. \quad (2.10)$$

Аналогично необходимо определить функции принадлежности для переменной *РЗ*.

Область рассуждений лингвистической переменной РЗ находится в диапазоне *Z=[0, T]*, где Т – максимально возможное время обслуживания какой-либо группы требований. Такой диапазон выбран исходя из того, что время обслуживания групп требований при оценке будет сравниваться с максимальным временем обслуживания [61].

Определены 3 лингвистических значения для переменной РЗ:

- «длительное время обслуживания»;
- «среднее время обслуживания»;
- «короткое время обслуживания».

Лингвистические значения расположены в таком порядке потому, что при длительном времени обслуживания группа имеет меньшие шансы поступить на обслуживание [67].

Каждое лингвистическое значение приведено в соответствие нечеткому множеству C_i^k. Где *i* – номер группы требований, *k* обозначает одно из

лингвистических значений, *k={1,2,3}*. *k=1* соответствует лингвистическому значению «короткое время обслуживания», *k=2* соответствует лингвистическому значению «среднее время обслуживания», *k=3* соответствует лингвистическому значению «длительное время обслуживания».

Используются функции принадлежности гауссова типа (2.4). Выбор показателя *c* определен исходя из максимального времени обслуживания группы. Для функций распределения заданы следующие параметры c и δ:

$$\mu_{C_i^1}(z_i): c^1=0,\ \delta=30,$$

$$\mu_{C_i^2}(z_i): c^2=0,\ \delta=30,$$

$$\mu_{C_i^3}(z_i): c^3=0,\ \delta=30.$$

Функция принадлежности для нечеткого множества C_i^1:

$$\mu_{C_i^1}(z_i)=\exp[-(\frac{z_i-0}{30})^2], \qquad (2.11)$$

где z – значение из множества Z.

Функция принадлежности для нечеткого множества C_i^2:

$$\mu_{C_i^1}(z_i)=\exp[-(\frac{z_i-T/2}{30})^2]. \qquad (2.12)$$

Функция принадлежности для нечеткого множества C_i^3:

$$\mu_{C_i^1}(z_i)=\exp[-(\frac{z_i-T}{30})^2]. \qquad (2.13)$$

Для функций принадлежности нечеткого множества C_i^k построены графики, изображенные на рис. 2.2.

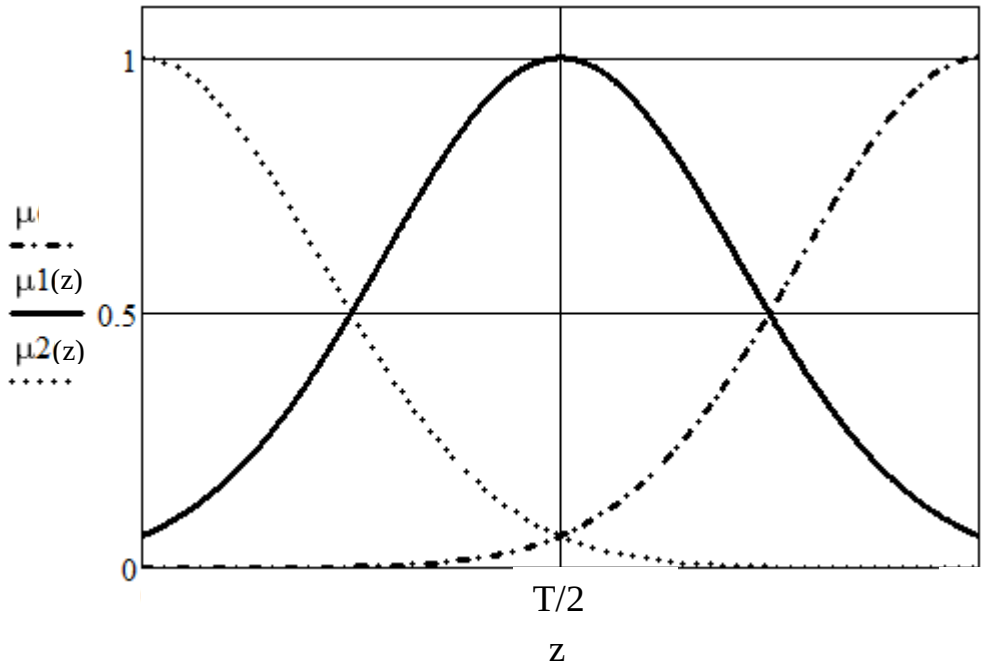


Рис. 2.2 – Графики функций принадлежности нечеткого множества C_i^k

В результате определения соответствия значений из областей рассуждений лингвистическим переменным *P1*, *P2* и *P3* для каждой группы требований, получено по 3 нечетких множества. Приведено соответствие полученных нечетких множеств и их функций принадлежности:

$$\overline{A}_i^k : \mu_{\overline{A}^k}(x_i),$$

$$\overline{B}_i^k : \mu_{\overline{B}^k}(y_i),$$

$$\overline{C}_i^k : \mu_{\overline{C}^k}(z_i).$$

Здесь $k=\{1,2,3\}$, x_i, y_i и z_i – значения из областей рассуждений переменных *P1*, *P2* и *P3* соответственно, i - номер группы требований.

Необходимо преобразовать нечеткие множества в единственное значение, которое позволит определить лучшую группу требований для обслуживания [6].

Дефаззификация выполняется методом по среднему центру. Значение средней точки для нечеткого множества $\overline{A}_i^k$ рассчитывается по формуле:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\bar{A}^k}(\bar{x}_i^k)\bar{x}_i^k}{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\bar{A}^k}(\bar{x}_i^k)}, \quad (2.14)$$

где $\bar{x}_i^k$ - это точка, в которой функция $\mu_{\bar{A}^k}(x_i)$ принимает свое максимальное значение, т.е. $\mu_{\bar{A}^k}(\bar{x}_i^k) = \max \mu_{\bar{A}^k}(x_i)$. Аналогично рассчитываются значения для средних точек $\bar{y}_i$ и $\bar{z}_i$ нечетких множеств $\bar{B}_i^k$ и $\bar{C}_i^k$ [69, 70].

Значение средней точки для нечеткого множества $\bar{B}_i^k$ рассчитывается по формуле:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\bar{B}_i^k}(\bar{y}_i^k)\bar{y}_i^k}{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\bar{B}_i^k}(\bar{y}_i^k)}, \quad (2.15)$$

где $\bar{y}_i^k$ - это точка, в которой функция $\mu_{B_i^k}(y_i)$ принимает свое максимальное значение, т.е. $\mu_{\bar{B}_i^k}(\bar{y}_i^k) = \max \mu_{\bar{B}_i^k}(y_i)$.

Значение средней точки для нечеткого множества $\bar{C}_i^k$ рассчитывается по формуле:

$$\bar{z}_i = \frac{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\bar{C}_i^k}(\bar{z}_i^k)\bar{z}_i^k}{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\bar{C}_i^k}(\bar{z}_i^k)}, \quad (2.16)$$

где $\bar{z}_i^k$ - это точка, в которой функция $\mu_{\bar{C}_i^k}(z_i)$ принимает свое максимальное значение, т.е. $\mu_{\bar{C}_i^k}(\bar{z}_i^k) = \max \mu_{\bar{C}_i^k}(z_i)$ [72, 80].

Принятие решения о запуске обслуживания *i*-ой группы требований основывается на показателе R_i, который представляет собой сумму средних точек $\bar{x}_i$, $\bar{y}_i$ и $\bar{z}_i$. Для определения меры влияния на принятие решения введены весовые коэффициенты. Таким образом, показатель $R_i = \bar{x}_i + 0.8 * \bar{y}_i + 0.5 * \bar{z}_i$. На обслуживание в устройство будет принята группа с максимальным показателем R_i [19].

2.3 Алгоритмизация дисциплины обслуживания очереди с нечеткими правилами

Для создания программного комплекса на основе разработанной дисциплины обслуживания очереди разработан алгоритм выбора требований для обслуживания.

Первый этап работы алгоритма – ввод исходных данных. В качестве исходных данных выступают:

- n – количество групп требований, обслуживаемы в системе;
- m – количество устройств обслуживания с нечеткими правилами дисциплины очереди;
- λ - интенсивность поступления требований;
- t_i – время обслуживания группы требований i-ой группы;
- N_i – количество требований в i-ой группе.

После ввода исходных данных рассчитывается количество групп требований N_{cd}, которые будут загружены, по формулам (2.1), (2.2), (2.3).

Следующий этап работы алгоритма – блок фаззификации. Этот блок запускается N_{cd} раз. В каждом цикле запуска выбирается 1 группа из очереди, поступающая на обслуживание в устройство с нечеткими правилами формирования очереди [93, 48].

В блоке фаззификации определяется степень принадлежности исходных значений нечетким множествам. В первую очередь определяется степень принадлежности к нечеткому множеству A_i^k по формулам (2.5), (2.6), (2.7). Затем степень принадлежности к нечетким множествам B_i^k по формулам (2.8), (2.9), (2.10). Последними определяются степени соответствия C_i^k по формулам (2.11), (2.12), (2.13).

На выходе получены нечеткие множества $\overline{A}_i^k$, $\overline{B}_i^k$, $\overline{C}_i^k$. Выполняется дефаззификация методом по среднему центру. Для этого используются формулы (2.14), (2.15), (2.16).

Для каждой группы рассчитывается показатель R_i, являющийся результирующим значением для принятия решения о загрузке группы требований на обслуживание.

Таким образом, можно составить словесно - формульный алгоритм выбора группы требований для обслуживания, основанный на дисциплине обслуживания очереди с нечеткими правилами.

Шаг 1. Ввод исходных данных: n, m, λ, t_i, N_i.

Шаг 2. Расчет вероятности, что все устройства свободны:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{m-1} \frac{(\lambda \bar{t})^k}{k!} + \frac{(\lambda \bar{t})^m}{(m-1)!(m-\lambda \bar{t})}}.$$

Шаг 3. Расчет вероятности, что все устройства заняты:

$$\pi = \frac{(\lambda \bar{t})^m P_0}{(m-1)!(m-\lambda \bar{t})}.$$

Шаг 4. Расчет количества устройств, свободных от требований:

$$N_{cd} = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{m-k}{k!} (\lambda \bar{t})^k P_0.$$

Шаг 5. Запуск цикла j от 1 до N_{cd}. По окончании шаг 23.

Шаг 6. Запуск цикла i по количеству групп требований. По окончании цикла шаг 21.

Шаг 7. Определение степени соответствия показателя количества требований в группе лингвистическому значению «низкая вероятность поступления» с использованием функции принадлежности:

$$\mu_{A_i^1}(x_i) = \exp[-(\frac{x_i - 0}{30})^2].$$

Получено нечеткое множество $\overline{A}_i^1$.

Шаг 8. Определение степени соответствия показателя количества требований в группе лингвистическому значению «средняя вероятность поступления» с использованием функции принадлежности:

$$\mu_{A_i^2}(x_i) = \exp[-(\frac{x_i - N_{im}/2}{30})^2].$$

Получено нечеткое множество $\overline{A}_i^2$.

Шаг 9. Определение степени соответствия показателя количества требований в группе лингвистическому значению «высокая вероятность поступления» с использованием функции принадлежности:

$$\mu_{A_i^3}(x_i) = \exp[-(\frac{x_i - N_{im}}{30})^2].$$

Получено нечеткое множество $\overline{A}_i^3$.

Шаг 10. Определение степени соответствия показателя вероятности поступления требования из группы лингвистическому значению «низкая вероятность поступления» с использованием функции принадлежности:

$$\mu_{B_i^1}(y_i) = \exp[-(\frac{y_i - 0}{30})^2].$$

Получено нечеткое множество $\overline{B}_i^1$.

Шаг 11. Определение степени соответствия показателя вероятности поступления требования из группы лингвистическому значению «средняя вероятность поступления» с использованием функции принадлежности:

$$\mu_{B_i^2}(y_i) = \exp[-(\frac{y_i - 50}{30})^2].$$

Получено нечеткое множество $\overline{B}_i^2$.

Шаг 12. Определение степени соответствия показателя вероятности поступления требования из группы лингвистическому значению «высокая вероятность поступления» с использованием функции принадлежности:

$$\mu_{B_i^3}(y_i) = \exp[-(\frac{y_i - 100}{30})^2].$$

Получено нечеткое множество $\overline{B}_i^3$.

Шаг 13. Определение степени соответствия показателя вероятности поступления требования из группы лингвистическому значению «короткое время обслуживания» с использованием функции принадлежности:

$$\mu_{C_i^1}(z_i) = \exp[-(\frac{z_i - 0}{30})^2].$$

Получено нечеткое множество $\overline{C}_i^1$.

Шаг 14. Определение степени соответствия показателя вероятности поступления требования из группы лингвистическому значению «среднее время обслуживания» с использованием функции принадлежности:

$$\mu_{C_i^2}(z_i) = \exp[-(\frac{z_i - T/2}{30})^2].$$

Получено нечеткое множество $\overline{C}_i^2$.

Шаг 15. Определение степени соответствия показателя вероятности поступления требования из группы лингвистическому значению «длительное время обслуживания» с использованием функции принадлежности:

$$\mu_{C_i^3}(z_i) = \exp[-(\frac{z_i - T}{30})^2].$$

Получено нечеткое множество $\overline{C}_i^3$.

Шаг 16. Дефаззификация нечеткого множества $\overline{A}_i^k$ по формуле

$$\overline{x}_i = \frac{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\overline{A}^k}(\overline{x}_i^k)\overline{x}_i^k}{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\overline{A}^k}(\overline{x}_i^k)}.$$

Шаг 17. Дефаззификация нечеткого множества $\overline{B}_i^k$ по формуле

$$\overline{y}_i = \frac{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\overline{B}_i^k}(\overline{y}_i^k)\overline{y}_i^k}{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\overline{B}_i^k}(\overline{y}_i^k)}.$$

Шаг 18. Дефаззификация нечеткого множества $\overline{C}_i^k$ по формуле

$$\bar{z}_i = \frac{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\bar{C}_i^k}(\bar{z}_i^k)\bar{z}_i^k}{\sum_{k=1}^{3} \mu_{\bar{C}_i^k}(\bar{z}_i^k)}.$$

Шаг 19. Определение результирующего значения

$$\bar{R}_i = \bar{x}_i + 0.8 * \bar{y}_i + 0.5 * \bar{z}_i.$$

Шаг 20. Возврат к шагу 6.

Шаг 21. Выбор $\bar{R}_{\max j}$.

Шаг 22. Возврат к шагу 5.

Шаг 23. Вывод $\bar{R}_{\max j}$ для каждого рассматриваемого устройства.

Шаг 24. Конец алгоритма.

На основе словесно - формульного алгоритма составлена блок – схема, показанная на рис. 2.3.

Разработанный алгоритм может учитывать любое количество свободных устройств и групп требований. Прерывание блока «Ожидание поступления требования» может осуществляться как под внешним влиянием – поступление нового требования, так и по прошествии определенного временного промежутка.

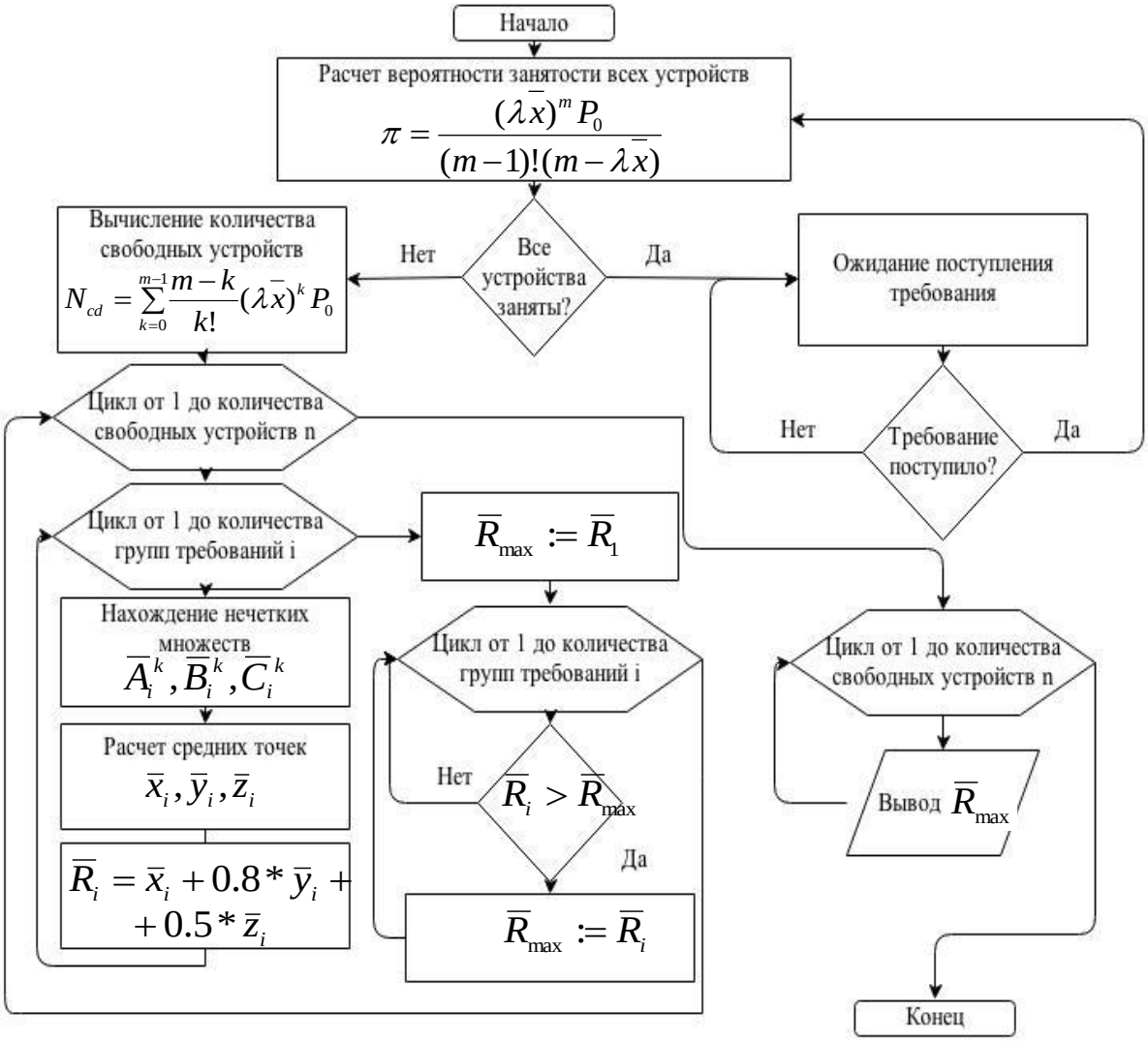


Рис. 2.3 – Алгоритм выбора группы требований

Выводы

1. Описаны особенности рассматриваемой многоканальной многофазной обслуживающей системы.
2. Разработана дисциплина обслуживания очереди, обеспечивающая выбор требований в соответствии с заданными параметрами, и отличающаяся учетом нечетких правил формирования очереди требований в СМО.
3. Составлен алгоритм определения группы для обслуживания, учитывающий особенности дисциплины обслуживания очереди с нечеткими правилами.
4. Разработанный алгоритм позволяет определять группы требований для обслуживания с учетом любого количества устройств в системе.

3.Разработка численного метода расчета количества устройств обслуживания в СМО с нечеткими правилами формирования очереди требований

В главе описывается разработка численного метода расчета количества устройств обслуживания в СМО с нечеткими правилами формирования очереди.

В первой части главы разработан численный метод расчета количества устройств в СМО. Далее описывается процесс адаптации разработанного метода к нечетким правилам дисциплины обслуживания очереди.

В главе приведено описание процесса алгоритмизации разработанных методов.

3.1 Численный метод расчета количества устройств в СМО

Разработанная дисциплина обслуживания очереди в главе 2 дает возможность выбора групп требований для обслуживания на устройствах с нечеткими правилами дисциплины очереди. Для корректного определения группы для обслуживания необходимо знать количество устройств обслуживания. Для этого разработан численный метод расчета количества устройств обслуживания в СМО с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди.

Исследование СМО, как правило, представляет собой анализ поведения системы в условиях случайных значений. В этом случае количество обслуживающих устройств выступает в качестве исходных данных. Однако возможно рассчитать количество требуемых устройств обслуживания системы под требуемые характеристики.

Расчет количества обслуживающих устройств позволяет заранее определить требуемые ресурсы для создания системы обслуживания. Также такой расчет может быть полезен при модернизации уже существующей обслуживающей системы. Точное определение количества обслуживающих устройств снижает затраты на создание обслуживающей системы [132].

Для расчета количества устройств обслуживания в диссертационной работе предлагается использовать метод на основе уравнений баланса. В первую очередь метод применяется для расчета количества устройств в СМО без нечетких правил дисциплины обслуживания очереди. Затем предлагается вариант адаптации изложенного метода к СМО с нечеткими правилами формирования дисциплины обслуживания очереди .

Пусть в рассматриваемой системе обслуживания предполагается обслуживание L типов групп требований. Для каждого $l = \overline{1, L}$ задано Q^l – количество требований, которое необходимо обслуживать в единицу времени.

В таком случае данные для требований будут задаваться с объединением по группам. Это упрощает учет всех данных для расчета, так как придется принимать

усредненные значения времени для операций обслуживания. Для многофазной многоканальной СМО с множеством различных обрабатываемых групп требований изменений в точности не последует [3].

Для каждой группы требований известна ее маршрутная карта, которая определяет порядок обслуживания требований .

Маршрутные карты задаются в виде графов, как показано на рис. 3.1, или в виде матриц. Матрица маршрутной карты C^l, $l = \overline{1, L}$, представляет собой квадратную матрицу размерности NxN, где N-число различных видов обслуживающих устройств, занятых в обслуживающих процессах рассматриваемой системы.

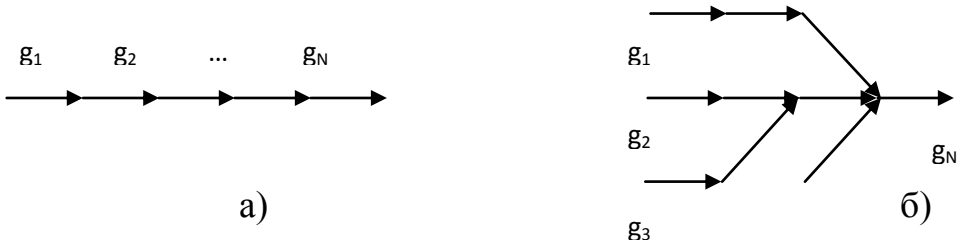


Рисунок 3.1 – а) линейный процесс обслуживания;

б) процесс обслуживания с объединением требований.

Задание маршрутной карты в виде матрицы наиболее удобно. Так как позволяет наглядно рассмотреть существующий маршрут и применить данные для последующих расчетов.

Максимальное число вершин графов маршрутных карт соответствует числу различных видов обслуживающих устройств. Однако может возникнуть ситуация, когда в процессах обслуживания не задействована часть устройств. В таком случае число вершин графов будет меньше числа групп устройств обслуживания. Для определенности необходимо пронумеровать все разновидности устройств обслуживания.

Элементы матриц C^l определены как элементы матриц смежности соответствующих графов маршрутных карт.

Учитывая, что в обслуживающей системе требования могут обрабатываться как по отдельности, так и группами, то необходимо задать матрицы γ_{ij}^{l}; $i=\overline{1,N}$; $j=\overline{1,N}$ - количества требований, обслуживаемое *i*-ой группой устройств, необходимое для обслуживания требований *j*-ой группой устройств при обработке заявок из *l*-ой группы. [12, 77]]

Если заранее известно количество требований, необходимое для следующей операции обслуживания, то матрицы γ_{ij}^{l} позволят рассчитать разбаланс устройств в группах.

В процессе обслуживания каждого требования отдельно все элементы матриц γ_{ij}^{l} равны 1. Это обуславливается отсутствием операций по объединению требований в группы. Поэтому для таких процессов справедливо следующее равенство:

$$\gamma_{\mu i}^{l}=\gamma_{i\nu}^{l} \qquad \forall\ \mu, i, \nu: \quad C_{\mu i}^{l}=1,\ C_{i\nu}^{l}=1. \qquad (3.1)$$

Для процесса, который требует объединения требований, равенство (3.1) может не выполняться.

Пусть задано время обслуживания требования *l*-ой группы на устройстве *i*-го типа - T_i^l. В случае, если требования рассматриваются по группам, то T_i^l - это среднее время обработки всех заявок группы по операциям. В случае, если расчет производится для каждой группы требований отдельно, то T_i^l - время обслуживания каждого конкретного требования [26].

Ввиду того, что расчет количества устройств обслуживания проводится для уменьшения затрат на создание или модернизацию СМО, то необходимо учитывать стоимость устройств [105].

Пусть *P* – обобщенная стоимость выбранного устройства обслуживания. Эта стоимость включает в себя обычную стоимость устройства, стоимость его установки и наладки в рассматриваемой системе.

Для обслуживания требований, разделенных на L групп, необходимо выбрать такое количество устройств обслуживания, которое обеспечит выполнение неравенства:

$P \le P_0$, (3.2)

Но, в то же время, это количество устройств обслуживания должно обеспечивать обслуживание всех требований в системе с заданными производительностями Q^l.

Данные ограничения позволяют определить количество устройств обслуживания для создаваемой СМО, в которой заранее известны затраты. Однако не учтена возможность расчета для существующей обслуживающей системы, которая подвергается модернизации. Необходимость расчета для существующей системы может возникнуть при увеличении потока требований.

В случае расчета количества обслуживающих устройств для существующей СМО в качестве ограничений выступает существующее количество устройств.

Пусть $K_{сущ}$ – существующее количество устройств обслуживания.

Тогда $K_{сущ\,i}$ – количество обслуживающих устройств в *i*-ой группе.

Для обслуживания требований *L* групп с заданной производительностью Q^l, необходимо выбрать такое количество устройств в группах, которое позволит выполнение неравенств:

$K_i \le K_{сущ\,i}$, (3.3)

где K_i – рассчитанное количество устройств в *i*-ой группе, $i = \overline{1, N}$.

В случае расчета количества устройств обслуживания для новой СМО или в случае расчета количества устройств обслуживания для существующей обслуживающей системы, в которой возможно увеличение числа обслуживающих устройств, задачу нахождения количества устройств можно сформулировать в следующем виде:

Решить задачу выбора количества устройств обслуживания, значит найти такой набор $\{K_i\}$, $i = \overline{1, N}$, который обеспечит выполнение неравенства (3.2) и обслуживание требований с запланированной производительностью Q^l [27, 30].

Далее рассматривается только процесс, учитывающий необходимость объединения требования для обслуживания. Это обусловлено тем, что процесс обслуживания каждого требования по отдельности можно представить как его частный случай.

Пусть вершины графов технологических маршрутов пронумерованы так, что вершина с максимальным номером соответствует последней операции *l*-го процесса в маршрутной карте. Пусть также число операций во всех маршрутных картах не меньше, чем N.

Если предположить, что обмен ведется через накопительный буфер, то уравнение баланса межгруппового обмена требованиями для N-ой вершины каждого *l*-го графа маршрутной карты можно записать в виде:

$$K_N^l = Q^l * T_N^l, \qquad l = \overline{1,L}. \tag{3.4}$$

Здесь K_N^l - число устройств обслуживания N-ой группы, необходимое для обеспечения обслуживания требований *l*-ой модификации с заданным Γ^l.

Уравнения баланса маршрута l-ой группы представляются в виде:

$$K_i^l = K_j^l * \gamma_{ij}^l * T_i^l / T_j^l, \qquad \forall_j : C_{ij}^l = 1; \tag{3.5}$$

$$l = \overline{1,L}; \qquad i = \overline{1,N}; \qquad j = \overline{1,N}.$$

Величины K_j^l вычисляются по формуле (3.4). После их расчета можно найти все K_i^l, для *i*, при которых $C_{ij}^l = 1$.

Здесь K_i^l - количество однотипных устройств обслуживания в *i*-ой группе рассматриваемых устройств, $i = \overline{1,N}$.

Решив уравнения баланса, найденные K_i^l представляют собой дробные числа. Поэтому их необходимо привести к целому виду

$$K_i^l = [K_i^l] + 1,$$

где $[K_i^l]$ – целая часть K_i^l.

Когда возникает ситуация, где $l_1 \neq l_2$, то, возможно, $K_i^{l_1} \neq K_i^{l_2}$. В данном случае это означает, что, при обслуживании требований из разных групп с заданными производительностями, одна и та же группа устройств обслуживания использует разное количество оборудования. В таком случае для обеспечения заданной производительности Q^l, $l = \overline{1,L}$, в рассматриваемой СМО, необходимо взять максимальное число устройств обслуживания в каждой из N групп

разновидностей устройств. Определить максимальное количество устройств можно следующим образом:

$$K_i^0 = \max_{l=\overline{1,L}} K_i^l, \quad i = \overline{1,N}.$$

Однако, при расчете необходимо учитывать ограничения на закупку и размещение оборудования [79].

Пусть s_i – параметр, определяющий геометрические характеристики устройства обслуживании. Тогда S_i - параметр, отвечающий за геометрические характеристики *i*-ой группы устройств. Необходимо, чтобы $S_0 \geq \sum s_i$. Если $S_0 < \Sigma S_i$, то необходимо провести пересчет геометрических характеристик с учетом отношения $S_0/\Sigma S_i$. Формулы пересчета:

$$K_i^{'} = \frac{s_0 K_i^0}{\Sigma s_i}. \qquad (3.6)$$

S_0 - доступное пространство для геометрических характеристик.

Аналогично производится пересчет по стоимостным параметрам по следующей формуле

$$K_i^{''} = \frac{p_0 K_i^0}{\sum_{i=1}^{N} p_i K_i^0}, \qquad (3.7)$$

где p_i – обобщенная стоимость одного устройства *i*-ой группы. [ссылка]

Таким образом, возможно рассчитать необходимое количество устройств обслуживания для обеспечения работы СМО с заданной производительностью, а также определить оптимальное количество устройств с учетом заданных ограничений. Однако зачастую требуется определить возможность обслуживания новых требований в уже работающей СМО. В этом случае нельзя использовать формулы пересчета по геометрическим и стоимостным параметрам, так как в системе уже функционирует некоторое количество устройств обслуживания [1, 89].

Пересчет по существующим устройствам необходим, если расчетное количество превысило фактическое.

Зачастую в существующую СМО добавляются новые устройства. В таком случае, часть устройств пересчитывается по стоимости, а часть по фактически имеющимся устройствам.

Необходимо рассмотреть ситуацию с новой СМО или вводом новых устройств в существующую систему. Пусть расчетное количество устройств обслуживания в группах при пересчете по геометрическим характеристикам равно $K_i^{'}$, $i=\overline{1,N}$, а количество устройств при пересчете по стоимостным параметрам равно $K_i^{''}$, $i=\overline{1,N}$. В таком случае для выполнения неравенства (3.2) количество устройств обслуживания выбирается из уравнения

$K_i = \min(K_i^{'}, K_i^{''})$.

Новые значения Q_*^l после пересчета определяются выражением

$Q^l = K_N / T_N^l$; $l=\overline{1,L}$

и соответствуют тем производительностям, которые возможны в рассматриваемой СМО при заданном P_0.

Таким образом рассчитывается количество устройств обслуживания для новой СМО. Однако, если рассчитывается количество устройств обслуживания применительно к существующей СМО и не вводятся новые устройства, то новые значения Q_*^l после пересчета будут определятся другим выражением.

После расчета количества устройств в существующей СМО необходима проверка условия (3.3).

В случае, если $K_i \geq K_{сущ\ i}$, $i=\overline{1,N}$, то количество устройств выбирается $K_{сущ\ i}$, $i=\overline{1,N}$. Тогда производительность на текущем количестве устройств определяется выражением

$Q_*^l = K_N / T_N^l$; $l=\overline{1,L}$

Такая производительность будет максимальной производительностью.

Если возможно увеличение количества устройств обслуживания, то применяются формулы (3.6), (3.7). Но, при пересчете по геометрическим и стоимостным параметрам не учитывается уже имеющиеся в системе устройства обслуживания.

3.2 Адаптация численного метода расчета количества устройств к нечетким правилам формирования очереди требований.

Вышеизложенный метод определения количества устройств обслуживания адаптирован для применения в линейных и не линейных, характеризующихся объединением требований, процессах обслуживания. Однако, система с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди, имеет свои специфические особенности.

Основным отличием рассматриваемой системы от классической является наличие устройства с нечеткими правилами формирования очереди требований. Основная особенность такого устройства обслуживания, которая определяет трудность расчета количественного состава, это одновременное обслуживания ряда требований. При этом множество требований заранее точно не известно. Учитывая эту особенность, по существующей методологии невозможно задать матрицы, определяющие количество единиц заявок *i*-ой группы устройств, необходимые для обслуживания заявок *j*-ой группы устройств при обработке требований *l*-ой группы на операции. Основной задачей разработанного численного метода является расчет количества требований, которые поступают на обслуживания в устройство с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди [57].

Таким образом, использование устройства с нечеткими правилами дисциплины очереди обслуживания в маршрутной карте приводит его к типу нелинейных. Однако после этого устройства каждое требование снова рассматривается отдельно.

Еще одна особенность рассматриваемой системы заключается в возможности циклов многофазности. То есть, требование может обрабатываться на одном устройстве несколько раз, в том числе и на устройстве с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди. Если рассматривать маршрутную карту такого многофазного процесса обслуживания, то можно составить список операций (в скобках указан номер, присваиваемый операции):

- Операция 1 (g_1)
- Операция 2 (g_2)
- Операция 3 (g_{3d})
- …
- Операция k (g_d)
- Операция k+1 (g_{k+1d})
- Операция k+2 (g_{k+2})
- …
- Операция n (g_n)

Здесь: n – максимальное количество операций, k – номер операции, принимающий значения $k \in [1, n]$. Номер операции, обозначенный с добавлением индекса d – операция на устройстве обслуживания с нечеткими правилами формирования очереди требований.

На рис. 3.2 маршрутная карта многофазного процесса представлена в виде графа.

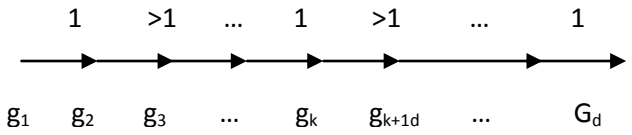


Рис. 3.2 - Граф маршрута требования

На рисунке снизу графа обозначены операции. Над операцией обозначено количество требований, которое необходимо обслужить предыдущему устройству перед работой следующего устройства. Количество требований для устройства, не требующего больше 1 заявки от предыдущего устройства, определено как 1. Для остальных устройств количество требований определено как >1. Это связано с тем, что заранее неизвестно количество требований для обслуживании на устройстве с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди.

На основе графа задана матрица маршрута требования C^l, где l – тип требования.

$$C^{l1} = \begin{vmatrix} 0 & h_i & 0 & 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & h_i & 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_i & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_i & ... & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ h_i & 0 & 0 & 0 & 0 & ... & 0 \end{vmatrix},$$

где h_i – максимальное количество использований i-го типа оборудования.

Задана матрица количества деталей, обслуживаемых *i*-ой группой устройств, необходимых для обработки заявок *j*-ой группой устройств при обслуживании *l*-ой группы:

$$\gamma_{ij}^1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & >1 & ... & 0 & 0 & 0 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & >1 & 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 1 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 & ... & 1 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 & ... & 0 \end{vmatrix}$$

Анализируя матрицу C^l и граф, изображенный на рис.3.1, можно определить, что количество вершин графов больше чем N – количество типов устройств. Однако, согласно методике, число различных групп устройств N совпадает с максимальным числом вершин графов. Поэтому добавляются обслуживающие устройства, использующиеся несколько раз.

Расчет количества устройств обслуживания для представленной маршрутной карты невозможно произвести по вышеизложенным формулам. Поэтому необходимо разработать численный метод преобразования маршрутной карты с циклами в простой технологический маршрут. За простой технологический маршрут примем маршрут, у которого отсутствуют повторы использования одного и того же устройства.

В первую очередь необходимо рассмотреть матрицу C^l. Для того, чтобы возможно было рассчитать количественный состав оборудования необходимо привести все ее значения к 1. Рассматривая маршрутную карту, можно определить, где начинается повторное использование устройств. С этого места необходимо разделить матрицу C^l на части по количеству циклов. Разбиение представленной выше маршрутной карты:

Таблица 3.1. Маршрутрная карта требования

Первый цикл	…	k-й цикл	…	n-й цикл
Операция 1 (g_1)	…	Операция k (g_k)	…	Операция n (g_n)
Операция 2 (g_2)	…	Операция k+1 (g_{k+1n})	…	
Операция 3 (g_{3n})	…	Операция k+2 (g_{k+2})	…	

В результате матрица первого цикла технологического маршрута C_1^1 будет выглядеть следующим образом

$$C_1^l = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Матрица k-й части технологического маршрута C_k^1 будет иметь вид

$$C_k^1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Но, ввиду того, что рассмотрение каждого отдельного процесса обслуживания может занимать много времени, необходимо разработать метод разделения матрицы на части. Для этого необходимо выделить повторяющиеся стадии технологического маршрута [49, 110].

Для разбиения матрицы маршрута требований будет использован маршрут, состоящий из операций, представленных в таблице.

Таблица 3.2

Номер операции	Обозначение	Тип устройства	Операция
1	g1	1	Операция 1
2	g2	2	Операция 1
3	g3	3	Операция 1
4	g4	1	Операция 1
5	g5	2	Операция 1
6	g6	3	Операция 1
7	g7	1	Операция 1
8	g8	2	Операция 1
9	g9	3	Операция 1
…	…		Операция 1
n	gn	m	Операция 1

n – общее количество операций, m – тип устройства обслуживания с максимальным значением N.

Матрица маршрута требований l-й группы C^l, состоящего из k циклов, выглядит следующим образом

$$C^l = \begin{vmatrix} 0 & k_{ij} & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & k_{ij} & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & k_{ij} \\ k_{ij} & 0 & 0 & ... & 0 \end{vmatrix},$$

где i – номер строки матрицы, j – номер столбца матрицы.

Необходимо из каждого элемента матрицы вычитать по единице до тех пор, пока максимальный элемент матрицы не станет равен 1. Это позволит выделить устройства, которые участвуют в циклах. После проведения этого действия матрица $C^{l}{}'$ будет выглядеть следующим образом

$$C^{l}{}' = \begin{vmatrix} 0 & k_{ij}-q & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & k_{ij}-q & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & k_{ij}-q \\ k_{ij}-q & 0 & 0 & ... & 0 \end{vmatrix},$$

где q – количество циклов в маршруте требований.

Из матрицы $C^{l}{}'$ можно выделить матрицу C^{l}_{ck}, которая будет содержать только маршрут, участвующий в k-м цикле. Однако в этой матрице нумерация строк и столбцов будет неполной, ввиду исключения устройств, не участвующих в циклах [25, 106].

Однако трудоемкость для каждой операции обслуживания, производимой на одном и том же устройстве, может быть различной. Пусть задана таблица трудоемкости для обслуживания требования

Таблица 3.3

Операция №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	…	n
Трудомкость	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	…	T_n
Обозначение	1	2	3	1	2	3	1	2	3	…	m

В случае, если операция обслуживания на одном устройстве происходит k раз и все трудоемкости операции на этом устройстве равны, то сначала рассчитываются значения количества устройств обслуживания для матриц C_{ck}^{l}, а затем полученное значение увеличивается в k раз. Если условие не выполняется, то необходимо рассчитать все K_{ik}, а затем сложить те, которые отвечают за одно и тоже оборудование. Здесь K_{ik} – количество устройств i-го типа в k-м цикле

После разбиения матрицы технологического процесса необходимо определить производительность устройств. Для этого задана матрица производительности устройств обслуживания, где переменными обозначены заранее неизвестные величины:

$$\gamma_{ij}^{1} = \begin{vmatrix} 0 & x & \ldots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & \ldots & 0 & x \\ 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 \end{vmatrix}, \qquad (3.8)$$

где x – заранее неизвестное количество требований в группе. При этом матрица γ_{ij}^{l} является квадратной с размерностью m, где m – количество типов устройств в обслуживающей системе.

Для правильного расчета количества устройств обслуживания необходимо разбить матрицу маршрута требования как описано выше. В результате разбиения матрица производительности будет иметь вид:

$$\gamma_{ij}^{k} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

где k – к-й цикл обслуживания

Пусть в рассматриваемой СМО обслуживается L типов требований, объединенных по общим признакам, но которые также могут различаться между собой. Устройство обслуживания одновременно обрабатывает группы требований. Поэтому для каждого $l = \overline{1, L}$ задано Q^l – количество групп требований l –го типа, которое необходимо обслуживать в единицу времени или производительность [90, 108].

Пусть d_i^l - i-ое требование l-го типа в группе, которая поступила на обслуживание. Общее количество требований в группе равно n. Устройство обслуживания обладает ограничением по количеству одновременно обрабатываемых требований, и может принимать не более S_Y^m требований, где m – тип устройства.

Количество требований одного типа может превышать ограничение обслуживающего устройства S_Y^m. Поэтому количество операций U^l, которые требуются для обслуживания всех требований одного типа l, определяется как:

$$U^l = \frac{n}{S_Y^m}, \qquad (3.9)$$

Формула (3.9) дает возможность рассчитать количество операций обслуживания без учета заданной производительности. Однако программа обработки требований может изменяться, в связи с чем, необходимо учесть возможные изменения в производительности. Также формула (3.9) не учитывает специфику размещения, доступную для некоторых групп [100, 109].

Для учета особенностей устройства обслуживания введен коэффициент размещения. Формула вычисления коэффициента размещения:

$$k_{RA} = 1 + \sum_{i=2}^{m} \frac{d_i^l}{n},$$

где m – количество разновидностей требований в одном типе L, d_i^l - количество одинаковых требований каждой разновидности в типе L, а n – общее количество требований в группе.

Ввиду того, что производительность не учитывается при расчете количества операций обслуживания по формуле (3.9), то формула (3.9) является актуальной для расчета количества устройств без учета производительности. Для учета заданной производительности необходимо увеличить полученное значение количества операций обслуживания в Q^l раз. С учетом производительности и коэффициента размещения формула (3.9) принимает вид:

$$U^l = \frac{n^l}{S_Y^m * k_{RA}} * Q^l \qquad (3.10)$$

По формуле (3.10) можно вычислить количество операций обслуживания при производительности Q^l. Но, при этом, не учитывается загрузка устройства обслуживания. При недостаточной или избыточной загрузке происходит нецелесообразное использование устройства обслуживания. В результате увеличиваются убытки [55].

Ввиду того, что загрузка не может достигать 100%, необходимо определять количество операций обслуживания U^l исходя из k_{ZA} - коэффициента загрузки устройства. Он выбирается исходя из технологических показателей устройства обслуживания. Для учета k_{ZA} в формуле расчета количества садок необходимо преобразовать формулу (3.10). Для того чтобы было возможно регулировать количество операций обслуживания при расчете загрузки вводится целочисленная переменная f. После преобразования формула (3.10) принимает вид:

$$U^l = \frac{n^l}{S_Y^m * k_{RA}} * Q + f^l, \qquad (3.11)$$

где f – целое число, f^l – переменная f для l-го типа требований.

После ввода переменной в формулу (3.10) необходимо определить получаемый во время расчет фактический коэффициент загрузки устройства обслуживания. Для определения расчетного k_z необходимо найти частное от деления количества операций по формуле (3.10) на количество операций, полученное по формуле (3.11) [59, 82, 111].

Таким образом коэффициент загрузки k_z, полученный путем расчетов равен:

$$k_z = \frac{U^l}{U^l + f^l}$$

В результате использования переменной f можно регулировать значение расчетного коэффициента загрузки k_z. При этом рассчитанный коэффициент загрузки должен быть меньше или равен заданному:

$$\frac{U_l}{U_l + f} \le k_{ZA} \qquad (3.12)$$

Из условия (3.12) можно получить *f*:

$$f^l \ge \frac{U^l}{k_{ZA}} - U^l \qquad (3.13)$$

Необходимо в формулу (3.13) подставить значения из формулы (3.10):

$$f^l \ge \frac{\frac{n^l}{S_Y^m * k_{RA}} * Q^l}{k_{ZA}} - \frac{n^l}{S_Y^m * k_{RA}} * Q^l \qquad (3.14)$$

Преобразовывая выражение (3.14) можно получить:

$$f^l \ge \frac{n^l * Q^l (1 - k_{ZA})}{S_Y * k_{RA} * k_{ZA}} \qquad (3.15)$$

Так как f^l - целочисленный коэффициент, то после расчета его необходимо привести к целому. В таком случае f^l будет определен как:

$f^l = [f^l] + 1$, где $[f^l]$ – целая часть f^l.

Полученная формула расчета количества операций обслуживания требований одного типа позволяет рассчитать среднее количество требований D^l, участвующих в каждой операции обслуживания. Для этого необходимо общее количество требований *l*-го типа увеличить на производительности и получить частное от деления на количество операций обслуживания одной группы. Расчет производится по формуле:

$$D^l = \frac{n^l * Q^l}{U^l}, \qquad (3.16)$$

где *n* – количество деталей в *l*-ой группе [32, 42].

Учитывая, что количество операций U^l является целым числом, а также то, что для правильного расчета U^l следует увеличить на f, можно формулу (16) записать в виде:

$$D^l = \frac{n^l * Q^l}{[U^l] + [f^l] + 1} \qquad (3.17)$$

Таким образом, рассчитывается количество деталей, необходимое для одной операции обслуживания группы требований. Полученная формула (3.17) позволяет заменить неизвестные переменные x в матрице (3.8) на D^l. В результате матрица (3.8) примет вид:

$$\gamma_{ij}^l = \begin{vmatrix} 0 & D^l & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & D^l \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Однако адаптированное уравнение баланса межгруппового обмена требованиями для устройства с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди будет отличаться от стандартного и имеет вид:

$$K_k^l = U^l * T_n^l,\ l = \overline{1, L} \qquad (3.18)$$

Это связано с тем, что общая трудоемкость обслуживания такого устройства зависит от количества операций по обслуживанию групп требований, а не от количества требований в группе [113, 114].

Уравнения баланса маршрута l-ой группы представляются в виде, аналогичном описанному в п. 3.1:

$$K_i^l = K_j^l * \gamma_{ij}^l * T_i^l / T_j^l, \qquad \forall\ _j : C_{ij}^l = 1;$$

$$l = \overline{1, L};\quad i = \overline{1, N};\qquad j = \overline{1, N}.$$

Величины K_j^l вычисляются по формуле (3.18). После их расчета можно найти все K_i^l, для i, при которых $C^l = 1$ [19, 96, 101].

Экспериментальное исследование разработанного численного метода расчета количества устройств обслуживания проводится в главе 4.

3.3 Алгоритм расчета количества устройств обслуживания с нечеткими правилами дисциплины очереди.

Для создания программного комплекса, реализующего разработанный численный метод разработан алгоритм расчета количества устройств обслуживания в СМО. Алгоритм позволяет рассчитывать как количество устройств в СМО с классическими дисциплинами обслуживания очереди, так и количество устройств с нечеткими правилами дисциплин обслуживания очереди требований.

Первой задачей является разработка формульно-словесного алгоритма, обеспечивающего расчет количества устройств обслуживания в СМО с классическими дисциплинами обслуживания очереди требований.

Первый шаг алгоритма – это задание исходных данных для расчета. Задаются матрицы γ_{ij}^{l}, определяющие требуемую производительность устройств обслуживания. Далее задаются матрицы C^{l}. Обе матрицы задаются для каждого типа требований l, $l = \overline{1, L}$ [103].

Необходимо задать требуемую производительность обслуживания Q^{l}. Это значение фактически играет решающую роль при расчете количества требуемых устройств обслуживания.

Следующий этап задания исходных данных – определение трудоемкости обслуживания требований T_N^{l} для каждой группы l и устройства N.

По окончанию сбора исходных данных можно рассчитать количество требуемых устройств по формуле (3.4). Баланс устройств маршрута l-ой группы рассчитывается по формуле (3.5)

После расчета необходима проверка неравенств. Для вновь рассчитываемой системы проверяется неравенство $P \le P_{0.}$

Если проводится расчет количества устройств в уже функционирующей системе то проверяется условие (3.3):

$K_i \le K_{сущ\,i}$

Для обоих случаев проверяется условие $S_0 \geq \sum s_i$.

Если какое-либо неравенство не удовлетворяет условиям, то проводится пересчет по формулам:

Таким образом, можно записать словесно-формульный алгоритм для расчета количества устройств обслуживания в СМО:

Шаг 1. Задание матрицы требуемой производительности устройств γ_{ij}^{l}.

Шаг 2. Задание матрицы маршрута требования в системе C^{l}.

Шаг 3. Задание производительности Q^{l}.

Шаг 4. Задание трудоемкостей обслуживания требований на устройствах T_N^{l}.

Шаг 5. Расчет количества устройств по уравнению $K_N^{l} = Q^{l} * T_N^{l}$, $l = \overline{1, L}$.

Шаг 6. Расчет баланса устройств по формуле $K_i^{l} = K_j^{l} * \gamma_{ij}^{l} * T_i^{l} / T_j^{l}$, $l = \overline{1, L}$, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, N}$.

Шаг 7. Проверка условия $P \leq P_0$. Если условие не выполнено, то шаг 11.

Шаг 9. Проверка условия $S_0 \geq \sum s_l$. Если условие не выполнено, то шаг 10.

Шаг 8. Проверка условия $K_l \leq K_{сущ\,l}$. Далее шаг 12.

Шаг 10. Пересчет значений по формуле $K_i^{'} = \frac{s_0 K_i^0}{\Sigma s_i}$. Далее *шаг 7*.

Шаг 11. Пересчет значений по формуле $K_i^{''} = \frac{p_0 K_i^0}{\sum_{i=1}^{N} p_i K_i^0}$. Далее *шаг 7*.

Шаг 12. Если условие в *шаге 8* не выполнено, то невозможно достич заданной производительности.

Шаг 13. Завершение алгоритма.

На основании составленного словесно-формульного алгоритма разработана блок-схема предложенного численного метода расчета количества устройств обслуживания в СМО, представленная на рис.3.3.

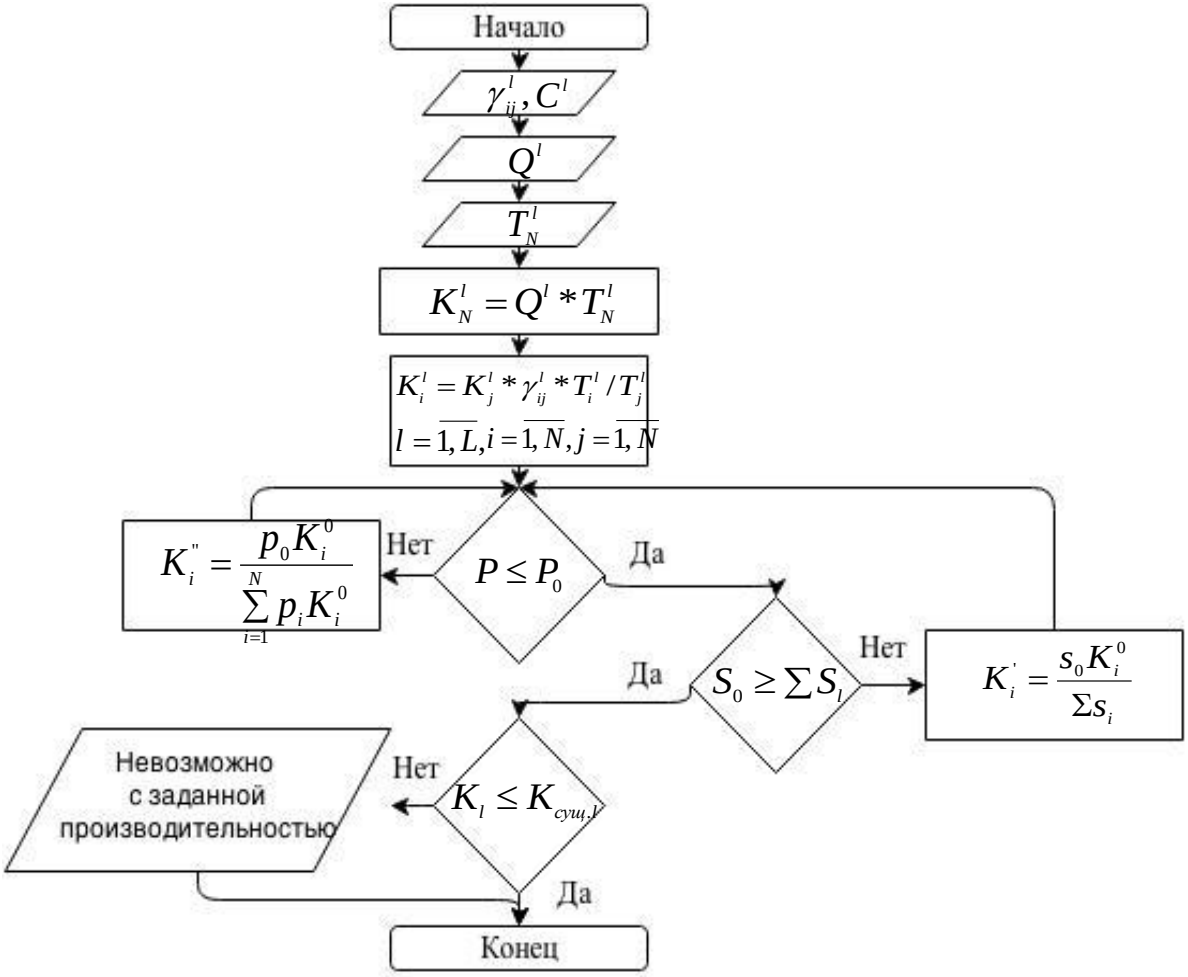


Рис.3.3 – Алгоритм расчета количества устройств обслуживания

Разработанный алгоритм позволяет рассчитать количество устройств обслуживания в системе с классическими правилами дисциплины очереди.

Следующий разработанный алгоритм позволяет определить количество устройств обслуживания в системе с нечеткими правилами дисциплины очереди.

Аналогично предыдущему алгоритму в первую очередь задаются исходные данные.

Задаются матрицы γ_{ij}^{l}, производительности устройств обслуживания. Задаются матрицы C^{l}. Обе матрицы задаются каждому типу требований l, $l = \overline{1, L}$.

Задается требуемая производительность обслуживания Q^{l}.

Задаются трудоемкости обслуживания требований T_N^{l} для каждой группы l и устройства N.

Первым этапом расчета выступает определение целочисленной переменной f по формуле (3.15), которая отвечает за регулирование количества операций обслуживания для одного типа требований.

На следующем этапе производится расчет количества операций обслуживания требований одного типа U^l на устройстве с нечеткими правилами формирования очереди по формуле (3.11).

Далее определяется количество требований в каждой операции обслуживания по формуле (3.17).

После того, как все показатели рассчитаны, производится расчет количества устройств обслуживания по адаптированному уравнению баланса (3.18). Также определяется разбаланс по уравнению (3.5).

Словесно-формульный алгоритм определения количества устройств обслуживания в СМО с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди записан в виде:

Шаг 1. Задание матрицы требуемой производительности устройств γ_{ij}^l.

Шаг 2. Задание матрицы маршрута требования в системе C^l.

Шаг 3. Задание производительности Q^l.

Шаг 4. Задание трудоемкостей обслуживания требований на устройствах T_N^l.

Шаг 5. Расчет значений $f^l \geq \dfrac{n^l * Q^l (1 - k_{ZA})}{S_Y * k_{RA} * k_{ZA}}$.

Шаг 6. Расчет значений $U^l = \dfrac{n^l}{S_Y^m * k_{RA}} * Q + f^l$.

Шаг 7. Расчет $D^l = \dfrac{n^l * Q^l}{[U^l] + [f] + 1}$.

Шаг 8. Расчет количества устройств по уравнению $K_k^l = U^l * T_n^l$, $l = \overline{1, L}$.

Шаг 9. Расчет баланса устройств по формуле $K_i^l = K_j^l * \gamma_{ij}^l * T_i^l / T_j^l$, $l = \overline{1, L}$, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, N}$.

Шаг 10. Вывод полученных значений.

Шаг 11. Завершение алгоритма.

При необходимости учета стоимости или существующих устройств в алгоритм вводится проверка неравенств и формулы пересчета.

На основании словесно формульного алгоритма составлена блок-схема, показанная на рис.3.4.

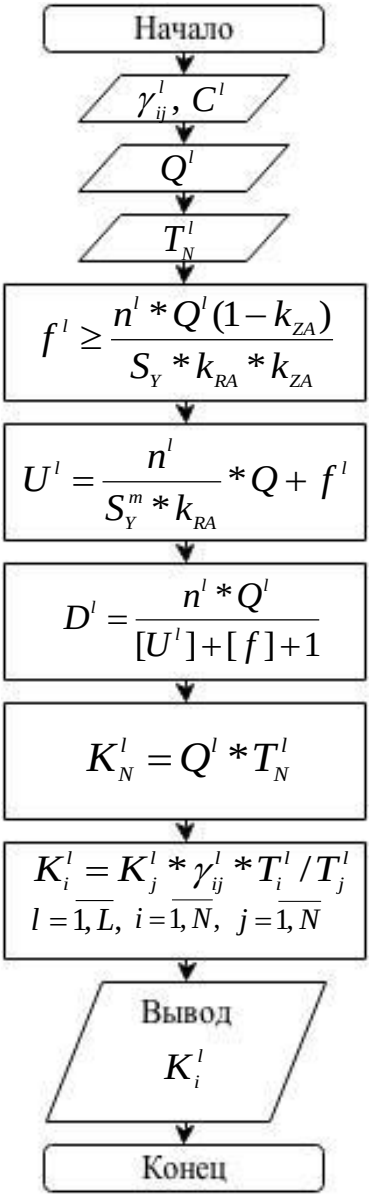


Рис. 3.4 – Алгоритм расчета количества устройств обслуживания в СМО с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди

Объединяя оба алгоритма в 1 можно создать общую сокращенную блок-схему. На рис.3.5 показана общая блок схема двух алгоритмов.

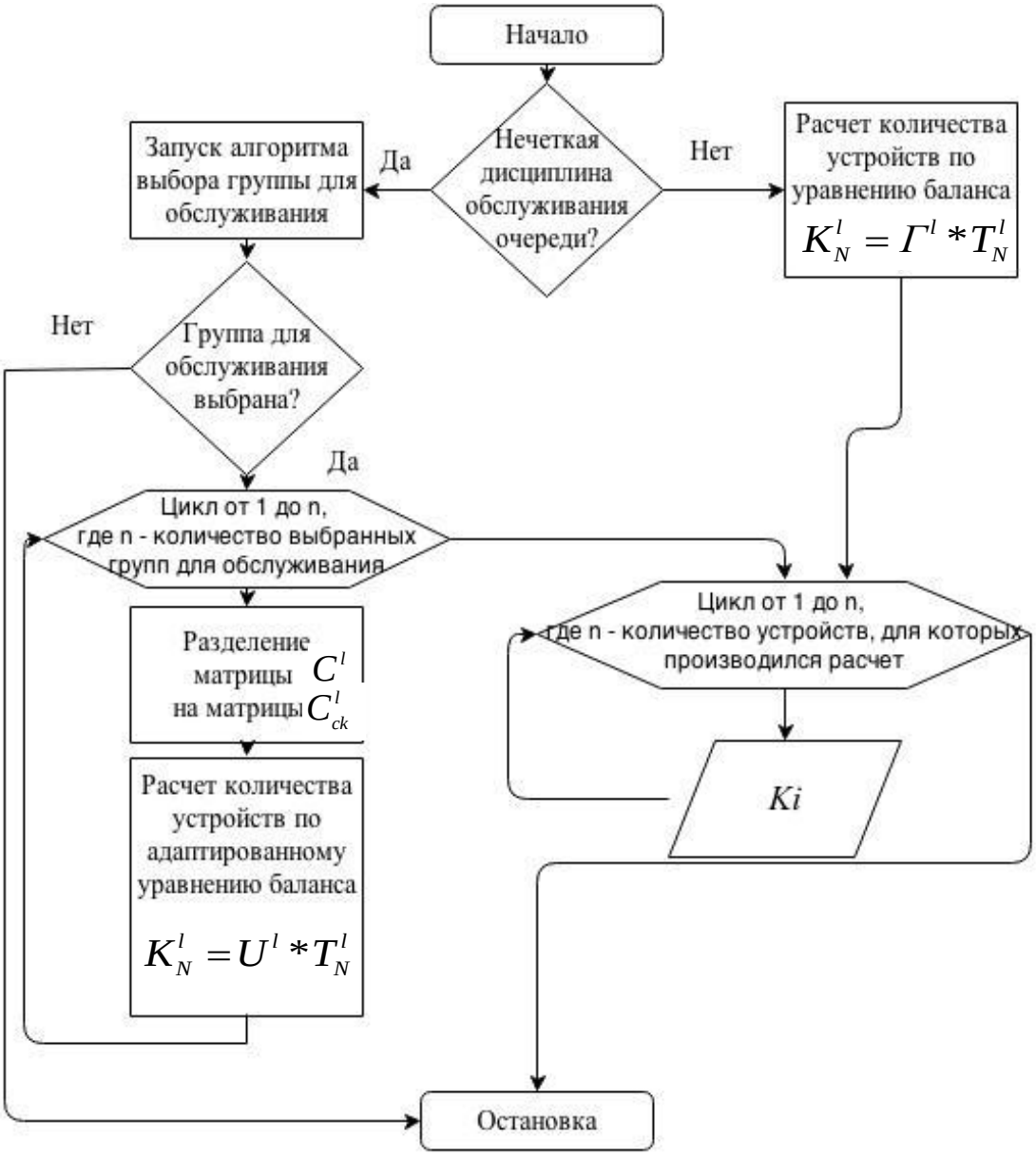


Рис. 3.5– Алгоритм определения количества устройств обслуживания в СМО с разными дисциплинами обслуживания очереди

Выводы

1. Разработан метод расчета количества устройств в обслуживающей системе, учитывающий ограничительные параметры и основанный на применении уравнений баланса.

2. Предложен численный метод расчета количества устройств обслуживания, позволяющий определять показатели СМО с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди и отличающийся применением адаптированных уравнений баланса.

3. Составлен алгоритм, реализующий разработанный численный метод, учитывающий особенности обслуживающих устройств.

Глава 4 Структура программного комплекса, экспериментальные исследования и результаты практической апробации

В главе рассматривается предложенная структура модифицированного программного комплекса имитационного моделирования. Описываются добавленные блоки и модули.

С использованием разработанного программного комплекса проводятся эксперименты, с целью определения эффективности работы модуля оптимизации и разработанного численного метода.

Приведены данные практической апробации разработанных дисциплины, метода, программного комплекса.

4.1 Структура модифицированного программного комплекса имитационного моделирования

Для модификации был выбран комплекс имитационного моделирования Tecnomatix Plant Simulation. Модификация основана на разработанных алгоритмах и методах расчета количества устройств обслуживания и выбора требований для обслуживания.

Новизна программного комплекса заключается в возможности гибкого управления исходными данными и идентификации параметров СМО с нечеткими правилами дисциплины очереди. Гибкость достигается за счет изменения дисциплины обслуживания очереди непосредственно во время имитационного прогона. Главной особенностью предложенной структуры является наличие блока управления очередью устройств обслуживания, который отвечает за контроль правил дисциплин очереди обслуживания и за их динамическое изменение. Стандартные дисциплины обслуживания очереди программного средства Tecnomatix Plant Simulation не позволяют учитывать нечеткие правила, а также не поддерживают динамического изменения.

Блок управления очередями устройств определяет необходимость применения дисциплины обслуживания очереди с нечеткими правилами. Применение дисциплины обслуживания, описанной в главе 2, целесообразно на устройствах со следующими свойствами:

- одновременное обслуживание групп требований, объединенных по общим признакам;
- все группы включают разное количество требований;
- устройство обслуживания имеет ограничение по количеству одновременно обслуживаемых требований;

В случае если устройство не обладает данными свойства, блок управления очередями требований переключает дисциплину очереди на одну из выбранных:

- FIFO (First In First Out);
- LIFO (First In Last Out);

- дисциплины обслуживания, доступные в программном средстве.

Однако даже если очередь устройства управляется дисциплиной обслуживания очереди с нечеткими правилами, то не всегда следует применять эту дисциплину. В случае, если в очереди находится 1 группа требований, то она автоматически поступает на обслуживание. В этом случае алгоритм дисциплины обслуживания очереди с нечеткими правилами не запускается, что сокращает время имитационного прогона. Также из рассмотрения исключаются группы требований, содержащие менее двух заявок. Принимать на обслуживание такие группы нецелесообразно. Обслуживание групп требований, состоящих из 1 требований, может привести к значительному повышению загрузки устройства [5, 40].

Блок идентификации параметров имитационной модели рассчитывает входные значения для проведения имитационного эксперимента. В случае если исследуется сложная система, а результат необходимо получить в кратчайшие сроки, применение имитационного эксперимента может оказаться нецелесообразным.

Для модификации программного комплекса разработан внешний модуль оптимизации. Назначение модуля – решение задачи нахождения оптимального количества устройств обслуживания в системе с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди. При этом оптимальным считается минимальное количество устройств, при заданных ограничениях[20, 21].

В формализованном виде постановка задачи выглядит как минимизация количества устройств:

$$\sum_{i=1}^{N} K_i \rightarrow \min , \qquad (4.1)$$

при условиях:

$$\begin{cases} M \geq \Gamma \\ V_{oi} \leq V_{\max i} \\ T_{ni} \leq T_{\max i} * T_m \\ i \in \{1...N\} \end{cases} \qquad (4.2)$$

Здесь:

K_i – количество устройств i-го типа;

$Г$ – количество требований, которые необходимо обслуживать в единицу времени;

M – фактически обслуживаемое количество требований в единицу времени;

V_{oi} – среднее количество требований в очереди для устройств i-го типа;

V_{maxi} – максимальное количество требований в очереди для устройств i-го типа;

T_{ni} – время простоя устройств i-го типа;

T_{maxi} – максимальное время простоя для устройств i-го типа, выраженное в процентном отношении от общего модельного времени;

T_m – общее время моделирования;

N – общее количество типов устройств.

Постановка задачи является линейной. Однако учитывая, что в рассматриваемой СМО применяются нечеткие правила дисциплины обслуживания очереди, поставленную задачу невозможно решить аналитически. Поэтому оптимизационную задачу внешний модуль решает известным методом эвристического поиска - генетическим алгоритмом [17, 18, 65].

Применяемый генетический алгоритм использует элитарную стратегию и многоточечное скрещивание. При этом не разрабатывалось новых положений по увеличению эффективности алгоритма. За основу был взят готовый вариант генетического алгоритма [14].

Таким образом, предложена оптимизационная задача определения количества обслуживающих устройств, отличающаяся учетом нечетких правил формирования очереди требований, и позволяющая найти количество различных типов устройств обслуживания в СМО с учетом заданных ограничений [73, 74].

Внешний модуль оптимизации представляет собой динамическую библиотеку, написанную на языке программирования c++ и подключаемую посредством API. На рисунке 4.1 представлена логика работы внешнего модуля оптимизации количества устройств обслуживания.

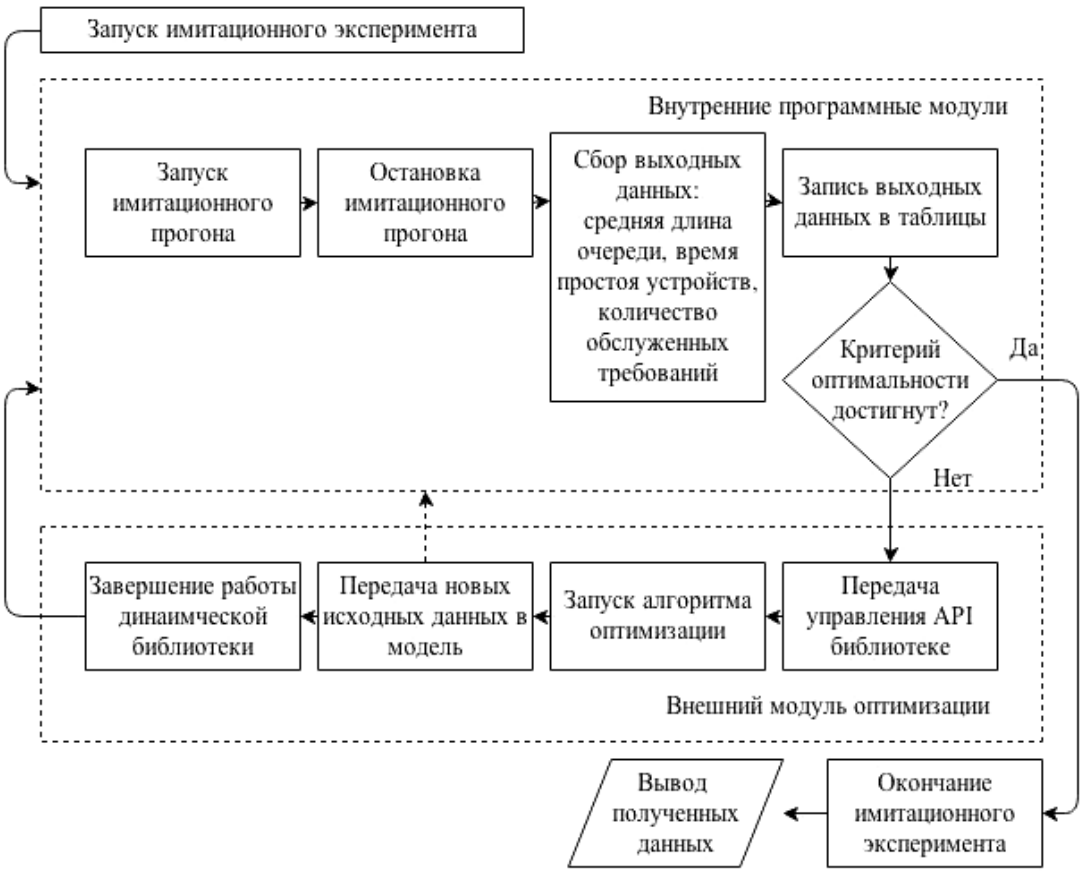


Рис. 4.1 - Логика работы внешнего модуля оптимизации

Использование таблиц, применяемых в имитационной модели, позволяет не использовать дополнительную базу данных. На рис. 4.2 представлен фрагмент программного кода, реализующие получение исходных данных. Полученные исходные данные заносятся в промежуточный массив *take*. Внешний модуль оптимизации различает первый и последующие имитационные прогоны. В первом имитационном прогоне исходные данные для обработки находятся в таблице исходных данных. При последующих имитационных прогонах данные заносятся в таблицу данных по конкретному имитационному прогону. В результате применения такой структуры можно получить исходные данные, которые использовались в каждом имитационном прогоне [53, 83].

```
if (counter.value.integer == 1)
{
    //Получение исходных значений
    UF_Value intTable = evalPath(0, ".Models.NumCalc.Enter", 0, 0);
    UF_Value take[50];
    take[50].type = UF_STRING;
    for (int i=1; i<7; i++)
    {
        take[i] = listAt(intTable.value.object, 3, i);
    }
    //исходные значения занесены в массив take[]

    //Кодирование значений
    UF_Value Kodirovka = evalPath(0, ".Models.NumCalc.Kodirovka", 0, 0);
    for (int i=1; i<7; i++)
    {
        UF_Value numzapis;
        numzapis.type = UF_INTEGER;
        numzapis.value.integer = i;
        listAtPut(Kodirovka.value.object, 1, i, &take[i]);
        listAtPut(Kodirovka.value.object, 2, i, &numzapis);
    }

    //Конец кодирования значений. Коды в таблице Kodirovka.
    //Запись в талицу итераций.
    UF_Value TableIter = evalPath(0, ".Models.NumCalc.TableIter", 0, 0);
    for (int i=1; i<7; i++)
```

Рис.4.2 - Фрагмент программного кода внешнего модуля оптимизации

На рис. 4.3 представлена структурная схема модифицированного программного комплекса.

Таким образом, предложена структура программного комплекса имитационного моделирования, отличающаяся динамическим изменением правил очередей требований, и позволяющая проводить численные эксперименты с целью идентификации параметров обслуживающей системы с нечеткими правилами формирования очереди требований [22, 23, 66].

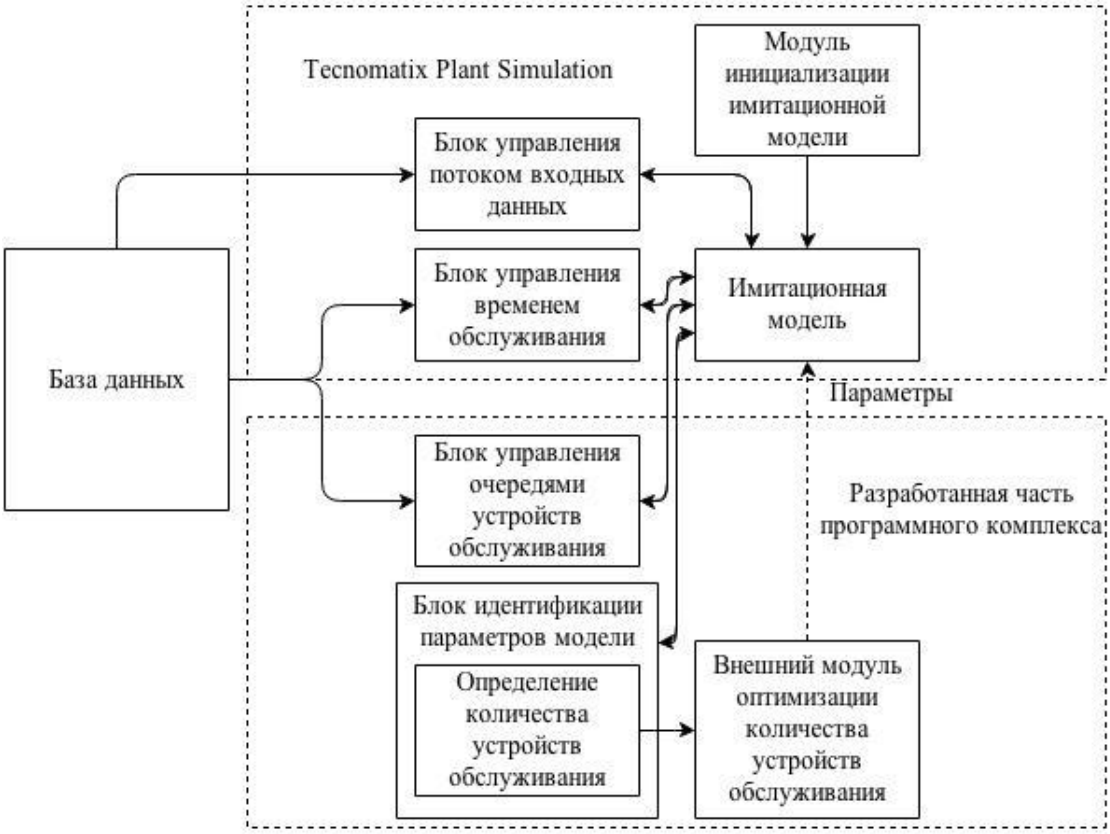


Рис. 4.3 - Структурная схема модифицированного программного комплекса

4.2 Экспериментальные исследования разработанного внешнего модуля оптимизации и предложенного численного метода расчета количества устройств обслуживания в СМО

Для определения эффективности разработанного внешнего модуля оптимизации необходимо провести экспериментальное исследование. Для этого создана имитационная модель сборки боковой панели и пилонов пассажирского самолета.

Для создания имитационной модели сборочного производства был использован директивный технологический процесс сборки боковой панели агрегата Ф-3 для самолета АН-148 и технологический процесс сборки пилонов.

Директивный технологический процесс сборки боковой панели состоит из 10 этапов. Каждый этап в имитационной модели представлен как отдельная стадия сборочного процесса. Такой подход обеспечивает наглядность и возможность быстрого внесения изменений в модель. Изменения могут затрагивать не только входные параметры, они также могут определять параметры рабочих ресурсов и материальных потоков. На рис. 4.4 изображена имитационная модель сборки боковой панели.

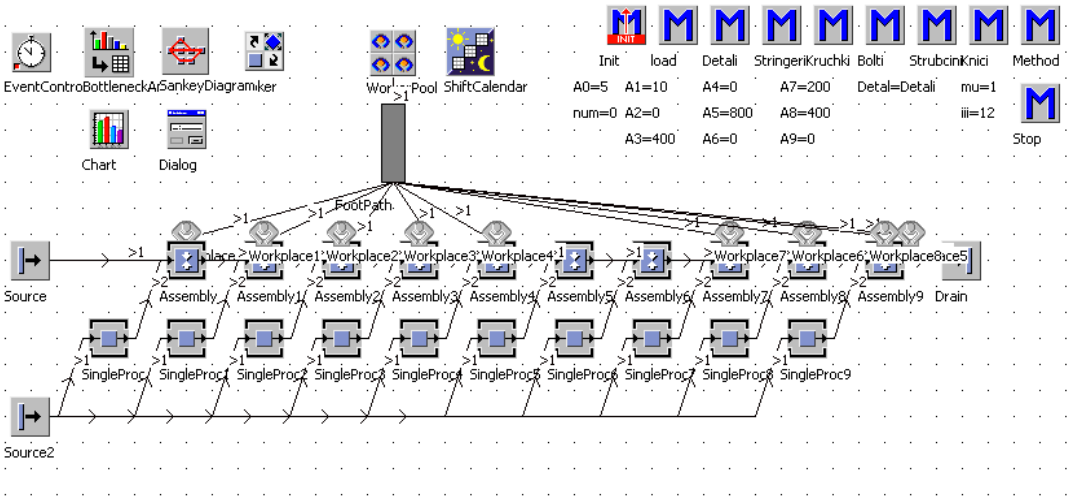


Рис. 4.4 Имитационная модель сборки боковой панели

Согласно цикловому графику процесс сборки пилона состоит из 28 операций. Имитационная модель содержит объекты, отвечающие за каждую

операцию. Время каждой занесено в таблицу. Таблица также содержит информацию о трудоемкости и количестве рабочих.

В имитационной модели возможно изменение времени проводимых работ. Для этого изменения вносятся в соответствующую таблицу. Затем запускается программный модуль, компилирующий код. Этот модуль отвечает за присваивание времени выполнения работы объекту. В результате каждому объекту, отвечающему за определенную работу, задается время обработки [84].

На рис.4.5 изображен фрагмент имитационной модели, отвечающий за имитацию сборки пилонов.

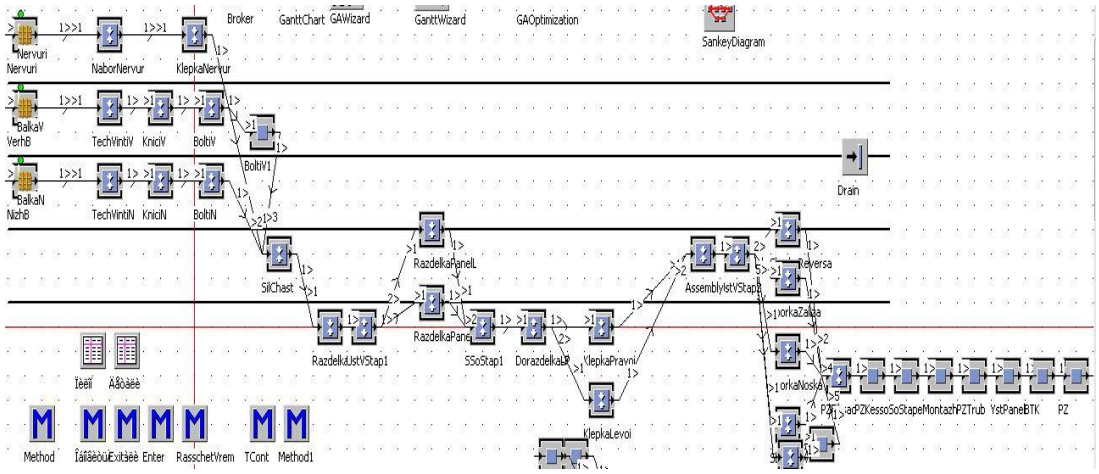


Рис.4.5 - Имитация сборки пилонов

Tecnomatix Plant Simulation предоставляет встроенные средства оптимизации имитационных моделей. С использованием этих средств произведен расчет оптимального количества сборочных приспособлений. При этом было проведено 2 эксперимента с различным количеством типов сборочных устройств K_T. Критерием оптимальности – минимизация количества сборочных приспособлений при заданной программе выпуска изделий.

Аналогичные эксперименты проведены с применением внешнего модуля оптимизации. Для проведения эксперимента использовался аналогичный критерий оптимальности – минимизация количества сборочных приспособлений при заданной программе выпуска изделий [112].

В результате проведенных экспериментов получены данные о количестве имитационных прогонов, выполненных до достижения критерия оптимальности. Полученные данные приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты эксперимента

	$K_T = 2$	$K_T = 5$
Без применения комплекса оптимизации	18	49
С применением комплекса оптимизации	15	40

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что разработанный внешний модуль оптимизации ведет к снижению количества имитационных прогонов, необходимых для достижения критерия оптимальности. Это значит, что внешний модуль позволяет быстрее находить оптимальные значения, что определяет его эффективность.

Для проверки эффективности разработанного численного метода расчета количества устройств в СМО с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди требований рассчитано необходимое количество оборудования для производства деталей самолета из композиционных материалов. Затем создана имитационная модель производства деталей самолета из композиционных материалов и определено оптимальное количество требуемого оборудования с применением внешнего модуля оптимизации. Эти результаты приведены в сравнение с результатами, полученными без учета нечеткости.

Производство деталей из композиционных материалов представляет собой СМО с наличием устройств, характеризующихся нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди. Таким устройством выступает автоклав.

Первый этап расчетов представляет собой использование разработанного численного метода. Для этого получены исходные данные, определяющие

технологический процесс производства деталей из композиционных материалов, и рассчитано требуемое количество оборудования.

Для производства одного комплекта деталей необходимо произвести 300 отдельных деталей. Детали, в свою очередь, подразделяются на группы по возможности совместного термостатирования в автоклаве.

В производстве всех групп деталей принимает участие одинаковое технологическое оборудование. Поэтому после отдельного расчета каждой группы необходимо рассчитать общее количество технологического оборудования, необходимого для производства всех деталей.

Далее приведен расчет количественного состава оборудования для 1 группы.

Общее количество деталей в группе 206. Все деталей 12 группы можно укладывать в 2 этажа. Поэтому коэффициент размещения равен 2. Коэффициент загрузки автоклава 0,8. Это обеспечит достаточно плотную загрузку и не повредит качеству термостатирования.

Технологический процесс производства деталей 12 группы представлен в таблице 4.2. Также таблица 4.2 содержит информацию об оборудовании, используемом в технологических операциях, и о месячном фонде рабочего времени оборудования.

Таблица4.2. Технологический процесс

Порядковый номер	Операция	Используемое оборудование	Месячный фонд рабочего времени, ч.
1	Подготовка поверхности	Верстак для подготовки оснастки	184
2	Раскрой препрега	Раскроечный комплекс	720
3	Выкладка препрега с применением систем лазерного позиционирования	Системы лазерного позиционирования	184

4	Подготовка к формованию	Верстак подготовки к термостатированию	184
5	Формование	Автоклав	720
6	Механическая обработка	Станок с ЧПУ	720
7	Нанесение ЛКП	Покрасочное оборудование	184

Как видно из таблицы, технологический процесс производства деталей 1 группы состоит из 7 операций. Однако некоторые операции возможно не учитывать в расчете.

Операции «Раскрой препрега» и «Нанесение ЛКП» можно не вводить в матрицу технологического процесса, которая будет использована для расчета количественного состава оборудования. Это связано с тем, что эти операции изначально не являются узким местом на производстве. Не учитывая эти операции при расчете, технологический процесс не будет нарушен. Это объясняется тем, что операция «Нанесение ЛКП» является последней операцией технологического процесса, а операция «Раскрой препрега» выполняется параллельно с операцией подготовки поверхности.

Также в матрицу технологического процесса не будет включена операция механической обработки, так как она будет нарушать уравнение баланса. Но расчет количественного состава оборудования для операции механической обработки будет произведен отдельно.

Матрица технологического процесса производства деталей 2 группы:

$$C^2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

В матрице C^1 при i=1,2,3,4 технологическое оборудование будет, соответственно: верстак, системы лазерного позиционирования, верстак 1, автоклав.

Матрица межгруппового обмена деталями:

$$\gamma_{ij}^{1} = \begin{vmatrix} 0 & D^{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D^{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D^{l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

В таблице 4.3 приведено время обработки деталей по операциям в часах.

Таблица 4.3 Трудоемкость обработки

Группа	$T_{1,}$, ч.	T_2, ч.	T_3, ч.	T_4, ч.	T_5, ч.
12	0.57	1.34	0.66	20	0.93

T_5 – время механической обработки деталей.

Первой задачей расчета является определение количества операций термостатирования для производства необходимого количества машино-комплектов.

$$U^{l}=7$$

Таким образом, для производства 5 машино-комплектов деталей 1 группы необходимо 7 циклов термостатирования.

Следующим этапом определения количественного состава оборудования является расчет количества деталей в каждой операции. Определить количество деталей в садке можно двумя способами. Первый способ – это деление общего количества деталей в 1 группе, умноженного на количество необходимых машино-комплектов, на количество операций:

(206*5)/7=148 деталей

Второй способ-это использование формулы, полученной в главе 3. Количество деталей по второй формуле будет равно:

(206*0,8*14*2)/30,76 = 151 деталь

Сравнивая два способа получения количества деталей в садке можно выделить более высокую точность второго способа. Садка – специфическое название операции термостатирования, которая учитывать загружаемые детали. Также, при использовании первого способа расчета количества деталей в садке, садки будут неполными, что понижает коэффициент загрузки автоклава.

Расчет времени работы автоклава:

$$K_{14}^{1} = U^{l} * T_{4}$$

$$K_{14}^{1} = 7 * 20 = 140 \text{ ч.}$$

Расчет времени для оборудования верстак для подготовки к термостатированию

$$K_{13}^{1} = U^{l} * D_{l} * T_{3}$$

$$K_{13}^{1} = 7 * 150 * 0.66 = 693 \text{ ч.}$$

Расчет времени работы систем лазерного позиционирования:

$$K_{12}^{1} = U^{l} * D_{l} * T_{2}$$

$$K_{13}^{1} = 7 * 150 * 1.34 = 1407 \text{ ч.}$$

Расчет времени работы подготовительного оборудования:

$$K_{11}^{1} = U^{l} * D_{l} * T_{1}$$

$$K_{11}^{1} = 7 * 150 * 0.57 = 598.5 \text{ ч.}$$

Расчет рабочего времени на механическую обработку деталей произведен аналогичным образом:

$$K_{MEX}^{1} = U^{l} * D_{l} * T_{5}$$

$$K_{MEX}^{1} = 7 * 150 * 0{,}93 = 976{,}5 \text{ ч.}$$

Зная месячный фонд рабочего времени оборудования можно найти коэффициенты загрузки технологического оборудования. Учитывая полученные коэффициенты и определив максимальную загрузку оборудования, можно определить требуемое количество оборудования, показанное в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Требуемое количество оборудования

Используемое оборудование	Месячный фонд рабочего времени, ч.	Время, затрачиваемое на производство деталей, ч.	Максимальный коэффициент загрузки	Коэффициент загрузки оборудования	Требуемое количество единиц оборудования
Верстак для подготовки оснастки	184	598,5	0,85	0,81(3,25)	4
Системы лазерного позиционирования	184	1407	0,85	0,85(7,64)	9
Верстак для подготовки к термостатированию	184	693	0,85	0,75(3,77)	5
Автоклав	720	140	0,8	0,194	1
Станок с ЧПУ для механической обработки	720	976,5	0,8	0,68(1,36)	2

Таким образом, рассчитан количественный состав оборудования, необходимый для производства деталей 1 группы, при производственной программе 5 машино-комплектов.

Ввиду того, что 1 группа не отражает всех особенностей расчета, проведен расчет количественного состава оборудования для 2 группы.

Общее количество деталей в группе 10. Часть деталей второй горуппы можно укладывать в 2 этажа, а часть деталей в 3 этажа. Поэтому рассчитанный коэффициент размещения равен 2,5. Коэффициент загрузки автоклава 0,8.

Технологический процесс производства деталей 2 группы представлен в таблице 4.5. Также как и для 12 группы в таблицу внесены данные об используемом оборудовании и месячном фонде рабочего времени оборудования.

Таблица 4.5. Технологический процесс

Порядковый номер	Операция	Используемое оборудование	Месячный фонд рабочего времени, ч.
1	Подготовка поверхности	Верстак для подготовки оснастки	184
2	Сборка на клеях по 1 переходу	Верстак для выкладки	184
3	Подготовка к формованию	Верстак для подготовки к формованию	184
4	Формование	Автоклав	720
5	Механическая обработка	Верстак для ручной механической обработки	184
6	Сборка на клеях по 2 переходу	Верстак для выкладки	184
7	Подготовка к формованию	Верстак для подготовки к формованию	184
8	Формование	Автоклав	720
9	Механическая обработка	Верстак для ручной механической обработки	184

Как видно из таблицы 4.5, технологический процесс производства деталей 2 группы состоит из 9 операций. Операция термостатирования в технологическом процессе выполняется дважды. Следовательно, необходимо разделить технологический процесс.

Матрица первой части технологического процесса производства деталей 2 группы:

$$C_{ij}^{2-1} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Матрица второй части технологического процесса производства деталей 2 группы:

$$C_{ij}^{2-2}=\begin{vmatrix}0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\\0&0&0&0\end{vmatrix}$$

Как видно обе матрицы идентичны. Однако при i=1 оборудование согласно первой матрице будет верстак для подготовки оснастки. А согласно второй матрице – верстак для ручной механической обработки. Поэтому эти 2 матрицы невозможно объединить в одну для упрощения расчета.

В матрице C_{ij}^{2-1} при i=1,2,3,4 технологическое оборудование будет, соответственно: верстак, верстак для выкладки, верстак 1, автоклав. В матрице C_{ij}^{2-2} при i=1,2,3,4 технологическое оборудование будет, соответственно: верстак для ручной механической обработки, верстак для выкладки, верстак 1, автоклав.

Матрицы межгруппового обмена деталями для обеих матриц технологических процессов будут идентичны и имеют вид:

$$\gamma_{ij}^{2}=\begin{vmatrix}0&D^{l}&0&0\\0&0&D^{l}&0\\0&0&0&D^{l}\\0&0&0&0\end{vmatrix}$$

В таблице 4.6 показано время обработки деталей по операциям в часах.

Таблица 4.6. Трудоемкость операций

Группа	T_1, ч.	T_2, ч	T_3, ч	T_4, ч	T_5, ч	T_6, ч	T_7, ч	T_8, ч	T_9, ч
2	1,5	1,9	0,4	19	1,5	4,1	0,42	19	2,2

T_9 – время механической обработки деталей.

Первой задачей расчета является определение количества садок для производства необходимого количества комплектов.

$$U^{l}=5$$

Таким образом, для производства 5 машино-комплектов деталей 2 группы необходимо 5 циклов термостатирования.

Необходимо определить количество деталей в каждой садке. Для этого используется формула, полученная ранее.

(10*0,8*14*2,5)/23 =12 деталей

Следующим этапом является расчет времени занятости производственного оборудования. После расчета времени по каждой отдельной операции следует просуммировать полученные значения.

Расчет времени работы верстака для подготовки оснастки:

$K_1^2 = 90$ ч.

Расчет времени для оборудования верстак для выкладки:

$K_2^2 = 360$ ч.

Расчет времени работы верстака для подготовки к формованию:

$K_3^2 = 49{,}2$ ч.

Расчет времени работы автоклава:

$K_4^2 = 180$ ч.

В таблице 4.7 приведены полученные значения количества единиц требуемого оборудования.

Таблица 4.7. Количество требуемого оборудования

Используемое оборудование	Месячный фонд рабочего времени, ч.	Время, затрачиваемое на производство деталей, ч.	Максимальный коэффициент загрузки	Коэффициент загрузки оборудования	Требуемое количество единиц оборудования
Верстак для подготовки оснастки	184	90	0,85	0,48(0,48)	1
Верстак для выкладки	184	360	0,85	0,65(1,96)	3
Верстак для подготовки к термостатировани	184	49,2	0,85	0,3	1

ю					
Автоклав	720	180	0,8	0,25	1
Верстак для ручной механической обработки	184	222	0,8	0,6(1,2)	2

В результате расчета необходимого количественного состава оборудования для 2 группы возможно оценить планируемые затраты для выпуска 5 машино-комплектов деталей в месяц.

Проводя расчет по всем представленным группам можно найти показатели трудоемкости для каждого типа оборудования. Суммируя полученные показатели возможно отыскать общую трудоемкость оборудования, требуемую для выпуска 5 комплектов деталей из композиционных материалов в месяц. Получив числовые показатели общей трудоемкости возможно найти количественный состав оборудования.

Расчет оптимального количества оборудования проведен на созданной имитационной модели производства средства внешнего модуля оптимизации. С применением модуля оптимизации найдено требуемое количество технологического оборудования в соответствии с критерием оптимизации (4.1) и ограничениями (4.2), характеризующегося нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди. Все полученные значения сравнивались со значениями, полученными без учета нечеткости. Значения для сравнения представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8. Результаты расчетов

	Механо-обрабатывающее оборудование	Верстаки подготовки	Системы позицио-нирования	Автоклавы
Значения, полученные без учета нечеткости	17	44	12	13
Значения, полученные с использованием комплекса оптимизации	17	44	12	12
Значения, полученные с использованием уравнений баланса	17	43	11	11

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что разработанный численный метод расчета количества устройств обслуживания показал лучшие результаты в ходе экспериментальных исследований. Таким, образом показана эффективность разработанного метода.

4.3 Результаты практической апробации программного комплекса

В ходе практической апробации программного комплекса имитационного моделирования создана модель производства деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Разработка имитационной модели проводилась в соответствии с Постановлением Правительства России от 9 апреля 2010 г. N 218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства", комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства авиационных агрегатов гражданских самолетов нового поколения с применением концепции гибких производств (гибких производственных систем) для постановки в серийное производство регионального самолета АН-148».

Имитационная модель производства деталей из ПКМ – это один из важнейших этапов создания цифрового производства. Цифровое производство деталей из ПКМ позволяет проанализировать существующие материальные потоки, рассмотреть возможности совершенствования материально-технической базы, оптимизировать загрузку оборудования, использование рабочих площадей. Для создания имитационной компьютерной модели рассмотрено производство деталей из ПКМ.

Производство деталей из ПКМ представляет собой совокупность производственных, заготовительных, лакокрасочных участков и участков термостатирования, деятельность которых направлена на создание конечного варианта деталей самолета.

Детали самолета из ПКМ подразделяются на несколько типов и изготавливаются методом автоклавного формования. Основной принцип изготовления деталей из ПКМ заключается в выкладке клеевых препрегов и последующем формовании в автоклаве. Однако существенные различия в технологии изготовления не позволяют одновременно изготавливать детали различных типов в одном автоклаве.

Технологию изготовления деталей можно подразделить на несколько этапов, общих для всех деталей: выкладка, механическая обработка, автоклавное формование, нанесение лакокрасочного покрытия и проверочные операции. Каждый этап изготовления выполняется на отдельном участке. Каждый участок имеет свое функциональное назначение.

Важным этапом подготовки к созданию имитационной модели является сбор исходных данных. Исходные данные производства деталей содержат:

1. Планировка производственных площадей.
2. Размеры участков.
3. Количество технологического оборудования.
4. Количество рабочих.
5. Производственная программа выпуска деталей.

Исходные данные детали содержат:

1. Номер детали.
2. Номер технологического процесса.
3. Номер перехода.
4. Трудоемкость изготовления.
5. Режим термостатирования детали.
6. Материал оснастки.
7. Наименование агрегата.
8. Номер мастера, отвечающего за изготовление детали.
9. Трехмерные модели деталей.

Исходные данные оснастки содержат:

1. Габариты оснастки
2. Материал изготовления оснастки
3. Режим термостатирования. Этот параметр закреплен за оснасткой, так как без оснастки деталь не подвергается термостатированию. Режим термостатирования – это главный критерий возможности совместного формования группы деталей.
4. Номер оснастки.

Изготовление каждой детали происходит по нескольким технологическим процессам. В исходных данных содержатся технологические паспорта деталей, а также директивные технологические процессы изготовления, упрощающие разработку и реализацию математической модели производства деталей. Каждый переход в технологическом процессе характеризуется трудоемкостью, измеряемой в нормо – часах [136, 142].

Для создания имитационной модели использовалось программное средство имитационного моделирования Tecnomatix Plant Simulation компании Siemens PLM Software. При моделировании в Tecnomatix Plant Simulation нет необходимости разделять все события на типы и рассматривать их отдельно. Выделение основных типов событий помогает рационально создавать связи в имитационной модели. Также эти события будет полезно выделить ввиду того, что Tecnomatix Plant Simulation позволяет перейти к дискретно-событийному моделированию. Основными типами событий в имитационной модели являются:

1. Поступление. Название события не отражает суть процесса в реальном производстве, так как производство детали начинается с поступления и очистки оснастки. Но для имитационной модели эта неточность допустима.
2. Обработка. Это событие подразумевает выкладку детали, механическую обработку, проверку на непроклей, нанесения лакокрасочного покрытия.
3. Термостатирование. Событие автоклавного формования детали.
4. Приемочный контроль.
5. Уход. Отправка детали на хранение.
6. Завершение моделирования.

Для создания имитационной модели действующего производства достаточно выделения этих пяти типов событий.

На рис.4.6 показано представление событий имитационной модели производства деталей из ПКМ в виде графов. При поступлении требования можно запланировать операции обработки. После обработки возможно планирование операций термостатирования и ухода детали.

После события поступления можно рассчитать, когда освободится рабочее место, и запланировать следующее поступление. Событие обработки объединяет несколько операций производства детали, поэтому можно запланировать следующее событие обработки.

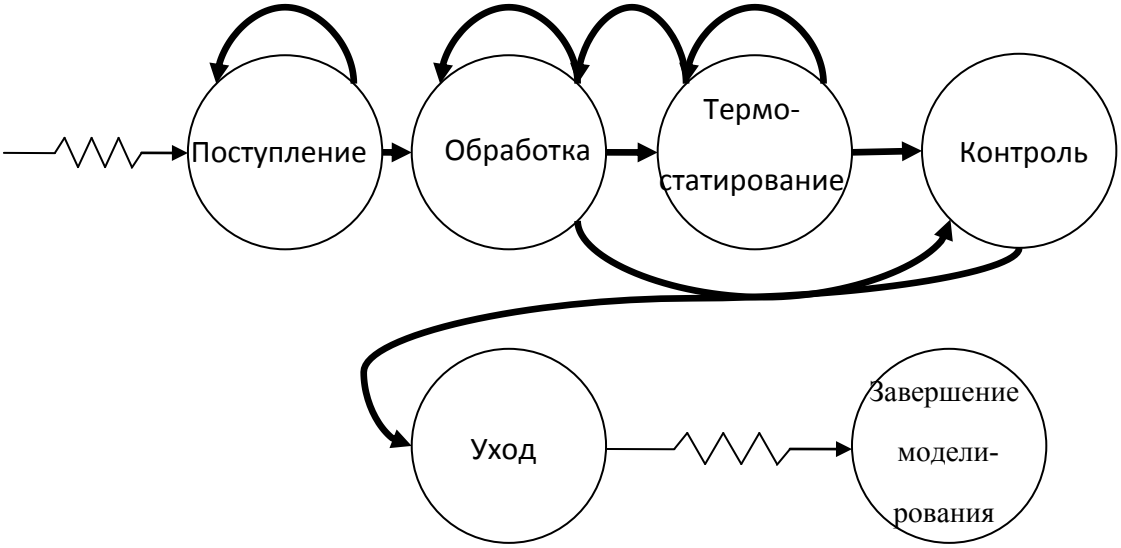


Рис. 4.6. Дискретно-событийная модель производства деталей из ПКМ

Перед созданием имитационной модели необходимо разработать общие принципы построения модели и взаимосвязи ее элементов. В правильно организованной модели изменение исходных данных или добавление новых параметров не влечет за собой перестроение части модели, затрагиваемой этими изменениями.

Имитационная модель имеет иерархическую структуру, где в имитационных прогонах участвуют потомки объектов родителей. При этом сами родительские объекты остаются неизменными, и изменения имитационных прогонов не влияют на последующие эксперименты с моделью.

Верхний уровень модели заполняется имитациями моделей участков. Каждая модель участка является потомком определенного объекта. Такой подход

создает гибкую модель, способную перестраиваться под требования пользователя. Имитация оборудования также является потомками объектов оборудования.

Структурная организация модели должна максимально точно повторять организацию производства деталей из ПКМ. Для достижения этой цели необходимо разделить модель на иерархические уровни. Эти уровни будут повторять организационное устройство производства: участок – рабочий, рабочее место, оборудование. Схема иерархической модели, применяемой в построении имитационной модели, изображена на рис. 4.7.

Рис. 4.7. Структурная схема имитационной модели

Верхний уровень модели представляет имитацию производства деталей из ПКМ. Этот уровень содержит объекты, имитирующие производственные участки. Также на верхнем уровне отображаются связи между участками. Эти связи представляют материальные потоки производства.

Имитации производственных участков составляют второй уровень имитационной модели. Все имитационные участки, кроме имитаций участков выкладки, представляют собой объекты и выполняют имитаций тех же действий что и реальные участки. Участки выкладки в имитационной модели разделяются по мастерам, а не по территориальной принадлежности. Связи между имитациями участков определяются на верхнем уровне имитационной модели.

Третий уровень модели представлен объектами, находящимися на участках. На третьем уровне происходит имитация обработки детали.

Каждый участок определенного вида обрабатывает заранее известные группы деталей. Участки механической обработки могут обрабатывать группы деталей, поступающие с разных участков выкладки и термостатирования. Участки термостатирования могут принимать любые группы деталей.

В модели присутствует по одной имитации участков проверки на непроклей и нанесения лакокрасочного материала.

Для организации имитационных участков разработана древовидная структура. Она содержит набор вложенных каталогов, хранящих объекты. Объекты определяют работу имитации оборудования, имитации материальных потоков производства, имитацию термостатирования деталей.

На верхнем уровне имитационной модели расположено несколько основных типов объектов:

- Объекты, имитирующие производственные участки;
- Объекты, управляющие имитацией и содержащие программный код;
- Объекты управления материальными потоками
- Объекты, анализирующие работу имитационной модели
- Таблицы с входными и выходными значениями
- Объект, управляющий временем имитации

На рис. 4.8 показан верхний уровень модели изготовления деталей из ПКМ.

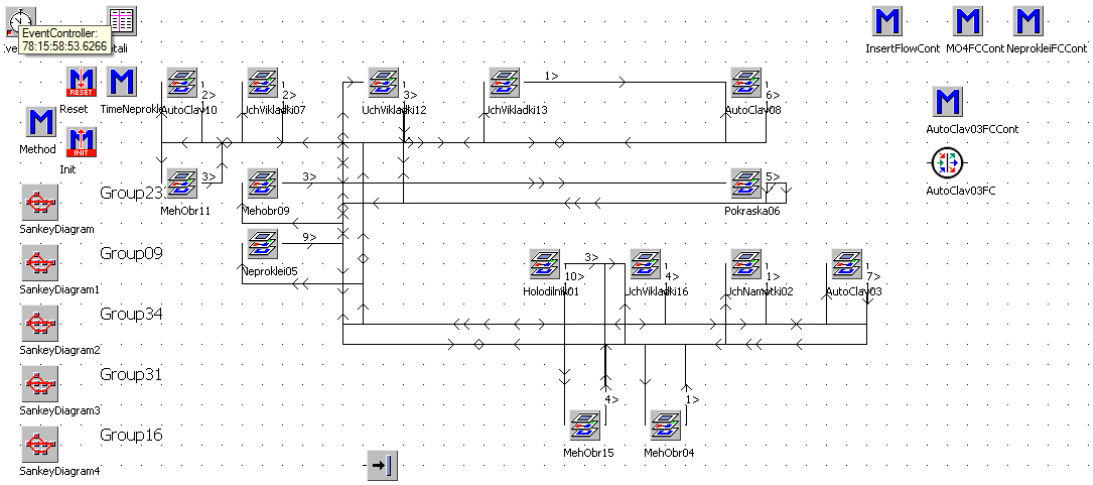


Рис. 4.8. Имитационная модель производства деталей из ПКМ

Верхний уровень имитационной модели производства деталей из ПКМ отображает материальные потоки производства. Меняя связи между моделями участков можно оценить возможности производства при разных исходных значениях. Все участки, расположенные на верхнем уровне имитационной модели производства находятся на местах, определенных чертежом плана производства. Таким образом, данные, полученные при анализе загрузки материальных потоков в модели, будут достоверно отображать деятельность производства.

Каждый тип оборудования определен своим объектом. Этот объект описывает поведение имитации оборудования и содержит информацию: о способе получения времени имитации обработки детали, о порядке имитации загрузки детали на оборудование, о перемещении детали после окончания имитации обработки.

В представленной имитационной модели существует 2 типа таблиц. Таблицы первого типа могут применяться на нескольких участках. Например, таблица, содержащая время имитации обработки деталей, применяется в пределах участка намотки, механической обработки, проверки на непроклей, нанесения лкп. Таблицы второго типа применяются исключительно в пределах модели участка. Таблица определения режима термостатирования детали находится в модели участка термостатирования.

Время имитации обработки зависит от номера технологического процесса и номера перехода. Определение времени имитации процесса происходит под управлением программного метода. Программный метод, используя заданные условия и, осуществляя поиск по таблице, определяет текущий технологический процесс и номер перехода детали.

Программные методы в модели разделяются по двум группам. К первой группе относятся методы, применяемые на нескольких участках. Вторую группу составляют программные методы, выполняющиеся в пределах одного участка и использующие информацию, находящуюся в пределах участка.

Каждая деталь, на протяжении имитации обработки, содержит специальный атрибут. Атрибут определяет номер операции, согласно таблице. После имитации обработки на модели оборудования происходит увеличение номера атрибута на заданное значение, зависящее от разновидности операций.

На рис. 4.9 приведен фрагмент программного кода метода, отвечающего за установку времени имитации обработки.

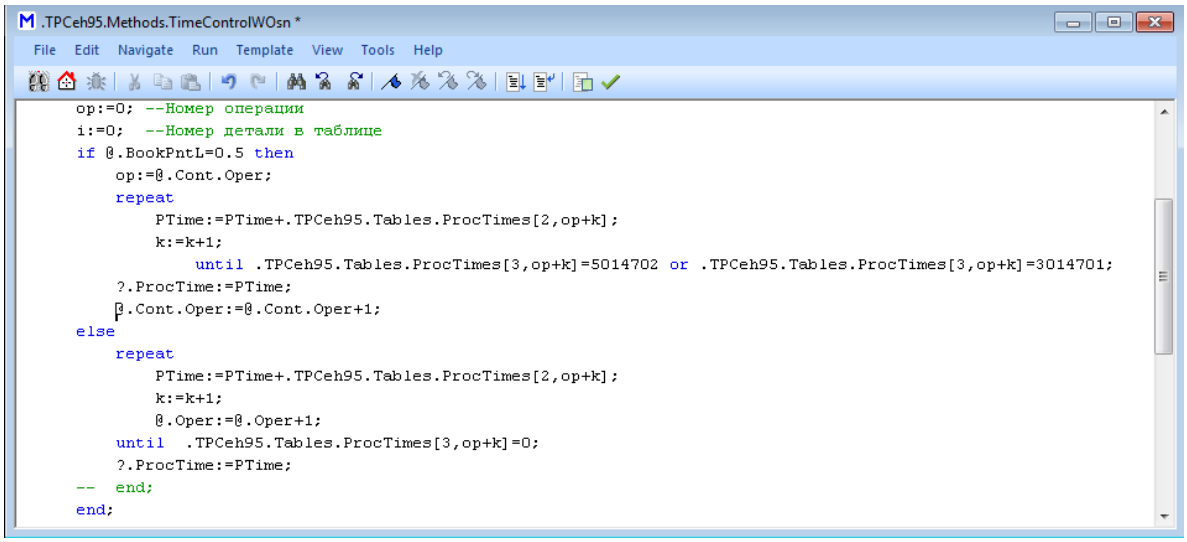


Рис. 4.9. Программный код метода определения времени имитации

После того как имитация детали поступает на обработку запускается приведенный программный метод. Метод работает по следующему алгоритму:

1. Обнуляются переменные, которые могут участвовать в выполнении других программных методов.

2. Проверяется условие: поступила деталь на обработку в оснастке или без оснастки.

3. Запись в локальную переменную «op» номера операции, относящегося к имитации детали.

4. Запуск цикла с постусловием для получения числового значения времени обработки имитации детали. Условие остановки – обнаружение в таблице номера следующей операции.

5. Выполнение тела цикла: поиск и считывание числового значения времени из таблицы.

6. Установка времени обработки имитации детали.

7. Увеличение текущего номера операции на единицу.

Таким образом, достигается установка времени имитации обработки для каждой детали на всех типах оборудования.

Имитация перемещения детали в модели достигается за счет создания родительского объекта для каждой имитации группы деталей. В случае, если деталь имеет несколько циклов термостатирования, то родительский объект создается для каждой отдельной имитации детали.

Применение родительских объектов, при создании моделей деталей, обеспечивает возможность подробного анализа материальных потоков.

На участке термостатирования происходит имитация обработки деталей в автоклаве. Цикл термостатирования деталей составляет 18 часов. Перемещения имитаций деталей на модель участка термостатирования определяет возможность загрузки деталей в автоклав.

Создан специальный метод, обеспечивающий расчет загрузки деталей в автоклав. После прибытия модели детали рассчитывается возможность загрузки деталей в автоклав 3х12 м. Если детали занимают площадь всей тележки, то осуществляется имитация загрузки автоклава.

В случае, если деталей недостаточно для автоклава 3х12м, то осуществляется проверка возможности загрузки автоклава 3х8м. В случае если деталей достаточно – осуществляется загрузка в автоклав 3х8м.

На рис. 4.10 изображена модель участка процесса термостатирования.

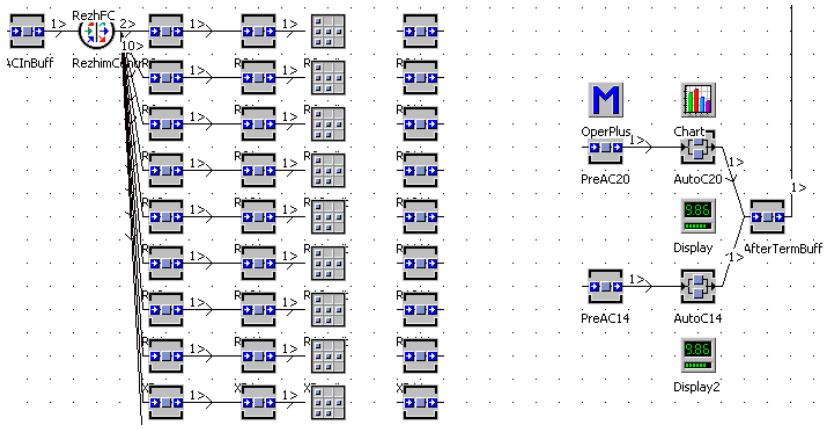


Рис. 4.10 Модель участка термостатирования

После окончания термостатирования происходит разделение детали на 2 объекта: модель детали и модель оснастки. Модели оснастки управляются объектом, контролирующим материальные потоки. Осуществляется проверка на необходимость дополнительного перемещения оснастки с деталью на участок намотки. Если для детали был осуществлен последний цикл термостатирования, то происходит имитация разделения детали и оснастки. Имитируется перемещение модели детали в модель участка механической обработки, согласно технологическому процессу. Имитация оснастки перемещается в модель участка намотки, где используется для изготовления следующей модели детали.

Главной задачей производства деталей из ПКМ является выпуск максимального количества деталей в месяц. Задача анализа производства деталей заключается в определении количества выпускаемых деталей и обнаружении узких мест.

Имитационный прогон позволил определить детали, задерживающие выпуск машино-комплекта деталей.

Анализ производства деталей определил задачи оптимизации:

1. Определение требуемого количества оснастки.

2. Определение оптимального количества рабочих на участках выкладки и механической обработки.

3. Определение требуемого количества автоклавов.

4. Оптимальная загрузка автоклавов.

Первая задача по определению необходимого количества оснастки представляет собой математическую задачу по определению количественных показателей. Проведение имитационного эксперимента позволило определить оптимальное количество оснастки.

Уменьшение необходимого количества оснастки возможно за счет увеличения месячного фонда времени, в частности за счет введения двухсменного режима.

Уменьшение очереди деталей на участках выкладки и механической обработки возможно за счет увеличения числа рабочих на этих участках. Для определения оптимального количества рабочих проведен имитационный эксперимент.

Оптимальная загрузка рабочих достигается за счет введения специализации. Рабочие подразделяются на работников участков выкладки и работников участков механической обработки. Согласно исходной трудоемкости, рабочих, задействованных на участках выкладки, требуется в 5 раз больше, чем рабочих, задействованных на участках механической обработки. Но, так как детали в автоклав и из автоклава поступают партиями, то прямой зависимости между количеством рабочих на участках выкладки и участках механической обработки не наблюдается.

Для определения количества специализированных рабочих на участках, проведен имитационный эксперимент. В ходе эксперимента проведено 70 имитационных прогонов и получены данные, определяющие количество рабочих на участках.

В результате поиска оптимальных значений в имитационной модели получена новая оптимизированная модель. Новая имитационная модель отвечает поставленным требованиям.

Таким образом, имитационная модель позволяет анализировать состояние производственной системы и определять узкие места. В результате имитационных экспериментов получены оптимальные значения показателей для повышения производительности изготовления деталей из ПКМ. Площади участков, отведенные под выкладку мастерам, достаточны для производства 5 машино-комплектов деталей в месяц. В результате проведения имитационного эксперимента по определению оптимального количества автоклавов, установлено, что на участке термостатирования достаточно 2 автоклавов с размерами 3м*8м и 3м*12м. Количество автоклавов можно сократить на 33%. Составлена оптимальная очередь запуска деталей в производство. Это увеличило количество изготавливаемых деталей в месяц на 18%. Оптимизация использования оснастки

показала возможность высвобождения 35% оснастки. Соответственно на 35% сократились площади межоперационного хранения.

Основываясь на полученных результатах, составлены практические рекомендации по оптимизации производства. «Акт приемки и передачи математических моделей оптимизированных производственных потоков», представленный в приложении, подтверждает внедрение полученных результатов в производство.

Выводы

В главе 4 получены следующие результаты:

1. Оптимизационная задача определения количества обслуживающих устройств, отличающаяся учетом нечетких правил формирования очереди требований, и позволяющая найти количество различных типов устройств обслуживания в СМО с учетом заданных ограничений.

2. Структура программного комплекса имитационного моделирования, отличающаяся динамическим изменением правил очередей требований, и позволяющая проводить численные эксперименты с целью идентификации параметров обслуживающей системы с нечеткими правилами формирования очереди требований.

3. Результаты вычислительных экспериментов, показывающих эффективность разработанного внешнего модуля оптимизации и эффективность разработанного численного метода расчета количества устройств обслуживания.

4. Компоненты программного обеспечения поданы на государственную регистрацию в ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», исходящий номер 1453.02:19 от 10.04.2014.

5. Модифицированный программный комплекс прошел практическую апробацию применительно к задаче определения оптимальных параметров обслуживающей системы, отличающейся нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди, на предприятии ОАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество».

Заключение

В ходе проведенных исследований, направленных на изучение многоканальных многофазных обслуживающих систем с нечеткими правилами формирования очереди требований, получены следующие результаты:

1. Разработана дисциплина обслуживания очереди, отличающаяся учетом нечетких правил формирования очереди требований в СМО, и обеспечивающая выбор требований в соответствии с заданными параметрами.

2. Предложен численный метод расчета количества устройств обслуживания, отличающийся применением адаптированных уравнений баланса, и реализованный в виде алгоритма определения показателей СМО с нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди.

3. Предложена постановка оптимизационной задачи определения количества обслуживающих устройств, позволяющая найти количество различных типов устройств обслуживания в СМО с учетом заданных ограничений, и отличающаяся учетом нечетких правил формирования очереди требований.

4. Разработана структура программного комплекса имитационного моделирования, отличающаяся динамическим изменением правил формирования очередей требований, и позволяющая проводить численные эксперименты с целью идентификации параметров обслуживающей системы с нечеткими правилами очереди требований.

5. Компоненты программного обеспечения поданы на государственную регистрацию в ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности», исходящий номер 1453.02:19 от 10.04.2014.

6. Модифицированный программный комплекс прошел практическую апробацию применительно к задаче определения оптимальных параметров обслуживающей системы, отличающейся нечеткими правилами дисциплины обслуживания очереди, на предприятии ОАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество».

Список литературы

1. . Альянах И.Н. Моделирование вычислительных систем. JL: Машиностроение, 1988.
2. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. М.:ЮНИТИДАНА, 2001, 432 с.
3. Барсегян А.А. Методы и модели анализа данных: OLAP И Data Mining / А.А. Барсегян,М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод. –СПб.:BHV, 2004. – 331 с.
4. Батыршин И. З., Основные операции нечеткой логики и их обобщение. – Казань: Отечество: 2001-100 с.
5. Башарин Г.П., Бочаров П.П., Коган Я.А. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. М.: Наука, 1989.
6. Борисов А.Н. Обработка нечёткой информации в системах принятия решений. – М.: Радио и связь, 1989. – 104 с.
7. Борисов В.В.Нечеткие модели и сети. - М. : Горячая линия -Телеком, 2007. - 284 с.
8. Бочаров П.П. Система MAP/Г/l/r в условиях большого коэффициента вариации времени обслуживания. Автоматика и телемеханика. 2005. №11.
9. Бочаров П.П., Вискова Е., Надаев Э. Марковская система массового обслуживания конечной емкости с отрицательными заявками в дискретном времени. Queues: Flows, Systems, Networks. 2005. № 18. P. 14-19.
10. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория массового обслуживания. М.: Изд. РУДН, 1995.
11. Буриков М.Д., Малинковский Ю.В., Маталыцкий М.А. Теория массового обслуживания. Гродно: Изд. Гродненского университета, 1984. 108 с.
12. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972.
13. Венцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. - 576 с

14. Вороновский В.К., МакотилоК.В., Петрашов С.Н. Сергеев С.А. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблема виртуальной реальности. Х.: ОСНОВА, 1997. – 112 с.

15. Герасимов А.И. Аналитические методы исследования и оптимизации вычислительных систем и сетей на основе сетевых моделей массового обслуживания. М.: Радио и связь, 2001. 240 с.

16. Герасимов А.И. О нормализующих константах в открытых и смешанных сетях массового обслуживания с несколькими классами сообщений / А.И. Герасимов // Доклады Академии Наук. 2008. - №3. - с. 314-318.

17. Гусев П.Ю. Автоматизация и оптимизация технологических процессов в Tecnomatix Plant Simulation / П.Ю. Гусев, М.И. Чижов, Ю.С. Скрипченко // Вестник Воронежского государственного технического университета, Том 7, №12.1, 2011 г., С. 36-38.

18. Гусев П.Ю. Генетические алгоритмы в оптимизации материальных потоков участка механической фрезерной обработки / П.Ю. Гусев, М.И. Чижов, Ю.С. Скрипченко // Вестник Воронежского государственного технического университета, Том 8, №12.2, 2012 г., С. 70-72.

19. Гусев П.Ю. Имитационное моделирование производства деталей из полимерных композиционных материалов / П.Ю.Гусев, М.И.Чижов, Ю.С.Скрипченко // Компьютерные исследования и моделирование, том 6, номер 2, 2014 г., С. 245-252.

20. Гусев П.Ю. Имитационное моделирование технологического процесса сборки боковой панели / П.Ю. Гусев, М.И. Чижов, Ю.С. Скрипченко // Вестник Воронежского государственного технического университета, Том 7, №12.2, 2011 г., С. 28-29.

21. Гусев П.Ю. Моделирование участка производства пилонов в Tecnomatix Plant Simulation / П.Ю. Гусев, М.И. Чижов, Ю.С. Скрипченко // Вестник Воронежского государственного технического университета, Том 7, №12.2, 2011 г., С. 4-5.

22. Гусев П.Ю. Применение уравнений баланса для расчета параметров обслуживающих систем с нечеткими правилами дисциплины очереди / П.Ю. Гусев, М.И. Чижов, Ю.С. Скрипченко // Системы управления и информационные технологии, №2(56), 2014 г.

23. Гусев П.Ю. Создание имитационной модели цеха производства деталей из полимерно-композиционных материалов / П.Ю. Гусев, М.И. Чижов, Ю.С. Скрипченко // Вестник Воронежского государственного технического университета, Том 8, №12.2, 2012 г., С. 73-75.

24. Д'Апиче Ч., Кристофано M.JL, Печинкин А.В. Система обслуживания МАРК/ Gk/1/oc с обобщенной дисциплиной преимущественного разделения прибора. Автоматика и телемеханика. 2004. №. 12.

25. Денис Дж. (мл), Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М.: Мир, 1988. - 440 с

26. Добров А.М. Прогнозирование науки и техники / А.М. Добров. – М.: ТВП, 1969. – 452 с.

27. Дюк В.А. Data Mining – интеллектуальный анализ данных // Информационные технологии: сайт. – URL: http://www.inftech.webservis.ru/it/database/datamining/ar2.html

28. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.

29. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. М.: Высшая школа, 1982.

30. Кан М.Н.; Технический анализ; ПИТЕР; 2003; 282 с.

31. Касконе Н., Разумчик Р.В. Экспоненциальная система массового обслуживания с отрицательными заявками и бункером для вытеснения заявок. Автоматика и телемеханика. 2008. №9.

32. Кейт А.; Технический анализ для начинающих/ Пер. с англ. – М.: - Альпина Паблишер, 2001. – 184 с.

33. Ким Ч.С., Клименок В.И., Орловский Д.С. Многолинейная система обслуживания с групповым марковским потоком и отрицательными заявками. Автоматика и телемеханика. 2006. №12.

34. Кирпичников А.П. Прикладная теория массового обслуживания. Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. 118 с.

35. Кирпичников А.П., Титовцев А.С. Методика оптимальной организации систем массового обслуживания с отказами и очередью. // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2008. - Т. 15 - Вып. 6. - С. 1090 -1091.

36. Кирпичников А.П., Титовцев А.С. Открытая одноканальная система массового обслуживания с отказами и неограниченной очередью.// Вестник Казанского технологического университета. 2006. - №4. - С. 78 — 85.

37. Кирпичников А.П., Титовцев А.С. Системы массового обслуживания с отказами и неограниченной очередью. // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2007. - Т. 14 - Вып. 5. - С. 893 - 896.

38. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.:. Машиностроение,1979.

39. Клименок В.И. О стационарном распределении вероятностей состояний системы массового обслуживания с пассивными приборами // Автоматика и телемеханика. 2000. №1. с. 88-97.

40. Кнут. Искусство программирования для ЭВМ. Т.3. Изд-во “Мир”, М.1978.

41. Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания // Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. 1971. т.9. 110с.

42. Ковальски Р. Логика в решении проблем. – М.: Наука, 1990. – 280 с.

43. Коган Я.А., Литвин В.Г. К вычислению характеристик системы массового обслуживания с конечным буфером, работающей в случайной среде// Автоматика и телемеханика. 1976. №12. с. 49-57.

44. Коротаев И.А., Спивак Л.Р. Системы массового обслуживания в полумарковской случайной среде // Автоматика и телемеханика. 1992. №7. с. 86-92.

45. Коротаев И.А., Ташлицкий И.А. Расчет характеристик системы массового обслуживания с групповым обслуживанием и ненадежным прибором // Стохастические модели сложных систем. Новосибирск, 1990. с.58-61.

46. Коротаев И.А., Терпугов А.Ф. Приближенный расчет характеристик адаптирующихся систем массового обслуживания со вспомогательными приборами // Автоматика и вычислительная техника. 1982. №6. с.61-65.

47. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложения. М.: Мир, 1965.

48. Круглов В.В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В.В Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голоунов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2001. – 224 с.

49. Лазарев В.Г., Саввин Г.П. Сети связи. Управление и коммутация. М.: Связь, 1973. 271с.

50. Лебедев Е.А. О стационарном распределении для сети обслуживания с узлами типа G/M / // Сетеметрия, анал. и моделир. инф.-вычисл. сетей. Куйбышев, 1988. с.53-61.

51. Леоленков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб., 2003.

52. Лифшиц А.Л., Мальц Э.А. Статистическое моделирование систем массового обслуживания. М.: «Сов. радио», 1978. 248с.

53. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию. –М.: Мир, 1990. – 432 с.

54. Ляхов А.И. Асимптотический анализ замкнутых сетей очередей, включающих устройства с переменной интенсивностью обслуживания// Автоматика и телемеханика. 1997. №3. с.131-143.

55. Мак-Каллок У.С., Питтс В. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности // В сб.: «Автоматы» под ред. К.Э. Шеннона и Дж. Маккарти. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – с.363–384.

56. Максимей И.В. Функционирование вычислительных систем. М.: Сов. радио, 1978. 271с.

57. Мандель Н.Д. Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.

58. Матвеев В.Ф., Ушаков В.Г. Системы массового обслуживания. М.: Изд. МГУ. 1984. 240 с.

59. Математическая энциклопедия. / Гл. ред. И.М. Виноградов. Т. 3. М.: Советская энциклопедия, 1982.

60. Математические методы исследования систем и сетей массового обслуживания: Тез. докл. 9 Белорус, зим. шк.-семин. по теории масс, об-служ. Минск, февраль, 1993. 108с.

61. Мелихов А.Н. Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 372 с.

62. Микадзе И.С., Хочолава В.В., Хуродзе Р.А. Виртуальное время ожидания в однолинейной СМО с ненадежным прибором. Автоматика и телемеханика. 2004. №. 12.

63. Митрофанов Ю.И., Рогачко Е.С. Управление распределением нагрузки в сетях массового обслуживания. Автоматика и телемеханика. 2008. №9.

64. Митрофанов Ю.И., Юдаева Н.В. Модели и анализ сетей массового обслуживания с управлением маршрутизацией // АиТ. 2000. №6. с. 104-113.

65. Модели информационных сетей и коммутационных систем / Под. ред. Харкевича А.Д., ГармашаВ.А. М.: Наука, 1982. 186с.

66. Моисеев А.Н. Синяков М.В. Разработка объектно-ориентированной модели системы имитационного моделирования процессов массового обслуживания. Вестник Томского государственного университета, 2010, №1. с. 89-93.

67. Назаров А.А. Адаптивное включение резервного прибора автоматом с целесообразным поведением // Автоматика и телемеханика. 1981. №3. с.170-174.

68. Назаров А.А. Об адаптивных системах массового обслуживания, управляемых автоматами с линейной тактикой // Автоматика и телемеханика. 1979. №5. с.99-103.

69. Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под редакцией Поспелова Д.А. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

70. Нечёткие множества и теория возможности / Под редакцией Р.Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.

71. Портенко Н.И., Скороход А.В., Шеренков В.М. Марковские процессы // Итоги науки и техники. Сер. соврем, пробл. мат. Фундам. направления / ВИНИТИ-1989. 46. с.5-245.

72. Прикладные нечёткие системы / Под редакцией Т.Тэрано. – М.: Мир, 1993. – 368 с.

73. Проблемы устойчивости стохастических моделей: Тр. семин. / ВНИИ систем исслед. Ред. Золотарев, Калашников. М., 1989.

74. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 847 с.

75. Разумный А.И. Постановка оптимизационной задачи логических операций сборочного конвейера автомобильной. Автотранспортное предприятие. Июль, 2009.

76. Разумный А.И. Прикладные аспекты теории массового обслуживания в реализации складских. Автотранспортное предприятие. Сентябрь, 2009.

77. Растригин JI.A. Современные принципы управления сложными объектами. М.: Сов. радио. 1978. 238с.

78. Риордан Дж. Вероятностные системы обслуживания. М.: Связь, 1966.

79. Российский энциклопедический словарь. / Гл. ред. А.М. Прохоров. Кн. 1. М.: Большая Российская энциклопедия, 2001.

80. Рутковская Д.Н. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Руткоская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. – М.: Горячая линия, 2006. – 452 с.

81. Саати Т. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: «Сов. радио», 1965.

82. Садовников А.А., Таций И.В. Применение теории массового обслуживания в решениях оптимизационных задач в производстве. Машиностроитель, 2008, №7. с. 2-5

83. Садовников А.А., Таций И.В. Решение управленческих производственных задач с применением теории массового обслуживания. Маркетинг. Теория и практика, 2008, №14. с.

84. Саксонов М.Т. Об управлении скачкообразными процессами при наличии конечномерных ограничений / Мат. моделир. процессов упр. в условиях неопределенности. М., 1987. с.101-118.

85. Самочернова Л.И. Многоуровневая система массового обслуживания с интенсивностью обслуживания, зависящей от времени ожидания / Том. политех, ун-т. Томск, 1995. 10с.

86. Самочернова Л.И., Нерзмекин А.Ф. СМО с гистерезисной стратегией управления интенсивностью обслуживания / Том. политех, ун-т. Томск, 1995. 11с.

87. Сатаев Е.А. Непрерывная зависимость финальных распределений от переходных вероятностей асимптотически марковского процесса // Теория вероятности и ее применения. 1995. 40. №1. с.183-188.

88. Скляревич Ф.А. Анализ эффективности фрагментов вычислительных сетей при полумарковском процессе сменов режима работы // Автоматика и вычислительная техника. 1984. №4. с.38-43.

89. Случайные процессы, математическая статистика и их приложение / МГУ, Мех-мат. фак. Ред. Гнеденко Б.В., Розанов Ю.А. М., 1989.

90. Стивен Б.А. Технический анализ от А до Я / Б.А. Стивен. – М.: Диаграмма, 1999. – 242 с.

91. Стрик Я. Предельные результаты для переключаемых марковских систем обслуживания с конечным числом источников // Кибернетика и сист. анал. 1994. №1. с.79-84.

92. Таранцев А.А. Инженерные методы теории массового обслуживания. СПб.: Наука, 2007. 175 с.

93. Таташев А.Г. Система массового обслуживания с переменной интенсивностью входного потока // Автоматика и телемеханика. 1995. №12. с.78-84.

94. Телеавтоматические системы массового обслуживания: Матер. Всес. конф., ноябрь 1986, ч.3. Кишинев: Тимпул, 1988. 114с.

95. Терпугов А.Ф. Приближенный расчет характеристик систем массового обслуживания при медленных флуктуациях интенсивности входящего потока // Управляемые системы массового обслуживания. Томск, 1982. Вып.1. с. 174-178.

96. Титовцев А.С. Открытые многоканальные системы дифференцированного обслуживания поликомпонентных потоков, дис.канд. тех.наук.

97. Тихоненко О.М. Модели массового обслуживания в информационных системах. Мн.: УП «Технопринт», 2003. 327 с.

98. Тихоненко О.М. Модели массового обслуживания в системах обработки информации. Мн.: Университетское, 1990. 191 с.

99. Тихоненко О.М. Системы обслуживания требований случайной длины с ограничениями// Автоматика и телемеханика. 1991. №10. с. 126-134.

100. Тихоненко О.М. Теория массового обслуживания. Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. 144 с.

101. Томас Р. Демарк Технический анализ – новая наука.

102. Тривоженко Б.В. Оценка интенсивности нестационарного пуассоновского потока // Поиск сигнала в многоканал. системах (Томск). 1985. №1. с.169-174.

103. Тутпубалин В.Н. Статистическая обработка рядов наблюдений. — М.: Знание, 1973.

104. Ушаков В.Г., Харитонцева И.Г. О системе с зависимыми временами обслуживания // Математические модели и цифровая обработка информации. М., 1990. с.154-163.

105. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. Т. 1. М.: Мир, 1964.

106. Фомин Г.И. Об однолинейной системе со случайно меняющейся скоростью обслуживания // Изв. АН СССР. Техн. кибернет., 1988. №1. с.134-137.

107. Хакимова Е.А. Методы теории массового обслуживания, используемые для оценки качества обслуживания в коммерческом банке. Маркетинг в России и за рубежом №1' 2010

108. Хочолава В.В., Микадзе И.С. Об одной модели системы массового обслуживания. Georg, engin, news. 2002. № 4. с. 47-52.

109. Цициашвили Г. Ш., Осипова М. А. Модели массового обслуживания с различными схемами преобразования и типами заявок. Дальневост. матем. журн., 7:1-2 (2007), 101-107

110. Чеботарев А.М. Достаточные условия регулярности скачкообразных марковских процессов // Теор. вер. и ее применен. 1988. 33. №1. с.25-39.

111. Юшкевич А.А. Управляемые скачкообразные марковские модели // Теор. вер. и ее применен. 1980. t.xxv. в.2. с.247-270.

112. Якубайтис Э.А. Архитектура вычислительных сетей. М.: Статистика, 1980. 279с.

113. Bailey N.T.J., A Continuous Time Treatment of a Simple Queue, Using Generating Functions, J. Roy. Statist. Soc., Ser. B, vol. 16, pp. 288-291, 1954.

114. Barrer D.Y., Queueing with Impatient Customers and Indifferent Clerks, Operations Research, vol. 5, № 5, 1957.

115. Barrer D.Y., Queueing with Impatient Customers and Ordered Service, Operations Research, vol. 5, pp. 650-656, 1957.

116. Bharucha Reid A.T. Elements of Markov processes and the applications, McGraw-Hill, 1960.

117. Bodino G.A., Brombilla F. Teoria delle code, Milano Vares, 1959, pp. 1219.

118. Burke P.J., Equilibrium Delay Distribution for One Channel with Constant Holding Time, Poisson Input and Random Service, Bell System Tech. J., pp. 10211031, 1959.

119. Champernowne D.G., An Elementary Method of the Solution of the Queueing Problem with a Single Server and Constant Parameter, J. Roy. Statist. Soc., Ser. B, vol. 18, № 1, pp. 125-128, 1956.

120. Clarke A.B., A Waiting Time Process of Markov Type, Ann. Math. Statist., vol. 27, pp. 452-459, 1956.

121. Clarke A.B., On the Solution of the «Telephone Problem», Univ. Michigan Rept. M720-1R39,1953.

122. Cox, Smith W.L. Queues, Methuen & Co, London, 1961.

123. Feller W., An Introduction to Probability Theory and Its Applications. John Wiley, New York, 1957.

124. Finsh P.D., Balking in the Queueing System Gl/M/1, Acta math. Acad. Sci. Hung., vol. 10, № 1/2, pp. 241-247, 1959.

125. Jackson J.R., Some Problems in Queueing with Dynamic Priorities, Univ. Calif., Management Sci. Research Project Paper 62,1959.

126. Karlin S., Mcgregor J., Many Server Queueing Processes, with Poisson Input and Exponential Service Times, Pasific J. Math., vol. 8, №1, pp. 87-118, 1958.

127. Kendall D.G., Some Problems in the Theory of Queues, J.Roy. Statist. Soc., Ser. B, vol 13, №2, pp. 151-185, 1951.

128. Kendall D.G., Stochastic Processes Occuring in the Theory of Queues and Their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain, Ann. Math. Statist., vol. 24, pp. 338-354, 1953.

129. Ledermann W., Reuter G.E., Spectral Theory for the Differential Equations of Simple Birth and Death Processes, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, vol. 246, pp. 321-369, 1954.

130. Lindley D.V., Mathematical Theory Marshalling & Queueing, Operational Research Quart., vol. 3, № 1, 1952.

131. Mellor S.D., Delayed Call Formulae When Calls Are Served in Random Order, P.O. Elec. Engrs. J., vol. 35, pt. 2, pp. 53-56, 1942.

132. Miller R.G., Jr., Priority Queues, Ann. Math. Statist., vol. 31, № 1, 1960.

133. Morse P.M., «Queues, Inventories and Maintenance», John Wiley, New York, 1958.

134. Morse P.M., Stochastic Properties of Waiting Lines, J. Operations Research Soc. Am., vol. 3, pp. 255-261, 1955.

135. Palm C., Research on Telephone Traffic Carried by Full Availability Groups, Tele., № 1, 1957.

136. Pollaszek F., La loi d'attente des appels telephoniques. Compt. rend., vol. 222, pp. 353-355,1946.

137. Riordan J. Stochastic Service Systems, Wiley and Sons, 1962, pp. 1-139.

138. Saaty T.L. Elements of Queuing theory with applications, McGraw-Hill, 1961, pp. 1-423.

139. Saaty T.L., Time Dependent Solution of the Many Server Poisson Queue, Operations Reaserch, 1960.

140. Syski R. Introduction to congestion theory in telephone systems, Oliver and Boyd, Edinburgh and London, 1960, pp. 1-742

141. Takacs L. Introduction to the theory of queues, Oxford University Press, 1962, pp. 1-268.

142. Vaulot A.E., Délais d'attente des appels telephoniques, traits au hasard, Compt. rend., vol. 222, pp. 268-269, 1946.

143. Wilkinson R.I., Working Curves for Delayed Exponential Calls Served in Random Order, Bell System Tech. J., vol. 32, pp. 360-383, 1953.

ПРИЛОЖЕНИЕ

«УТВЕРЖДАЮ»
от ИСПОЛНИТЕЛЯ
Проректор по научной работе и международным связям
ФГБОУ ВПО «ВГТУ»
_____А.Д. Поваляев
«_____» 2012 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
от ЗАКАЗЧИКА
Технический директор
ОАО «ВАСО»
_____А.В. Ткачев
«___» _____2012 г.

АКТ

приемки и передачи математических моделей оптимизированных производственных потоков

Договор от «15» июля 2010 г. № У177/10-2820

«___»_____2012 г. *Воронеж*

Комиссия из представителей Заказчика, назначенная Приказом ОАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» №___ от _____2012 г. «О создании комиссии по приему математических моделей производственных потоков» в составе:

Председатель	*Заместитель технического директора ОАО «ВАСО»*	*Соловьев Виктор Александрович*
члены комиссии	*Заместитель технического директора ОАО «ВАСО», главный технолог*	*Белякин Вячеслав Борисович*
	Заместитель технического директора ОАО «ВАСО» по развитию	*Астапов Игорь Владимирович*
секретарь комиссии	*Помощник генерального директора по организационному развитию*	*Быков Александр Иванович*

и представителей Исполнителя:

Заведующий каф. КИТП, ФГБОУ ВПО «ВГТУ»	*Чижов Михаил Иванович*
Профессор кафедры КИТП	*Скрипченко Юрий Степанович*
Аспирант кафедры КИТП	*Гусев Павел Юрьевич*

ознакомившись с математическими моделями производственных потоков изготовления технологических комплектов деталей и узлов из полимерно-композиционных материалов (ПКМ):

№ п/п	Наименование	Кол-во, шт.
1	Математическая модель производственных потоков изготовления комплектов деталей и узлов из ПКМ, созданная по исходным данным предприятия ОАО ВАСО	1
2	Оптимизированная математическая модель производственных потоков изготовления технологических комплектов деталей и узлов из ПКМ	1

предоставленных кафедрой КИТП ФГБОУ ВПО «ВГТУ», а также изучив результаты расчетов по данным моделям, установила:

1. Математические модели производственных потоков изготовления машинокомплектов деталей и узлов из ПКМ, разработанные согласно исходным данным, полученным от ОАО ВАСО, отображают реальный производственный процесс.
2. Анализ математической модели производственных потоков изготовления машинокомплектов деталей и узлов из ПКМ показал соответствие модели реальному производству.
3. Оптимизированная математическая модель производственных потоков изготовления комплектов деталей и узлов из ПКМ позволяет рассчитать и обосновать дополнительные ресурсы, необходимые для выполнения производственной программы выпуска деталей и узлов из ПКМ в месяц.

Выводы:

1. Разработанные математические модели производственных потоков изготовления машинокомплектов деталей и узлов из ПКМ могут быть переданы ОАО ВАСО.
2. Данные, полученные в результате работы математических моделей производственных потоков изготовления технологических комплектов деталей и узлов из ПКМ, позволяют анализировать и оптимизировать производственный процесс.
3. Рекомендации, полученные в результате работы математических моделей производственных потоков изготовления технологических комплектов деталей и узлов из ПКМ, позволяют обосновать дополнительные ресурсы, необходимые для выполнения производственной программы выпуска деталей и узлов из ПКМ.

Приложения:

1.Математические модели материальных потоков на электронном носителе информации (DVD – 1 шт.).

Председатель	*Заместитель технического директора ОАО «ВАСО»*		*В.А. Соловьев*
члены комиссии	*Заместитель технического директора ОАО «ВАСО», главный технолог*		*В.Б. Белякин*
	Заместитель технического директора ОАО «ВАСО» по развитию		*И.В. Астапов*
секретарь комиссии	*Помощник генерального директора по организационному развитию*		*А.И. Быков*

Согласовано от ФГБОУ ВПО «ВГТУ»:

Заведующий каф. КИТП, ФГБОУ ВПО «ВГТУ»		*М.И. Чижов*
Профессор кафедры КИТП		*Ю.С. Скрипченко*
Аспирант кафедры КИТП		*П.Ю. Гусев*