

На правах рукописи



**ЛАЩЕНОВ Дмитрий Павлович**

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
СЛОЖНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ  
ПЕРЕНАСТРАИВАЕМЫХ МОДУЛЕЙ ТИПОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Научный руководитель **Бурковский Виктор Леонидович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты **Шмырин Анатолий Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», кафедра высшей математики, заведующий кафедрой.

**Абрамов Петр Борисович**  
кандидат технических наук, доцент, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», кафедра автоматизированных систем управления и информационной безопасности, старший преподаватель.

Ведущая организация Автономная некоммерческая организация высшего образования «Российский новый университет» (г. Москва).

Защита состоится «23» апреля 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.037.13, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» [www.cchgeu.ru](http://www.cchgeu.ru).

Автореферат разослан «16» марта 2021 г.

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



Гусев К.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современных условиях определилась устойчивая тенденция к необходимости повышения технико-экономических показателей функционирования сложноструктурированных реконфигурируемых систем, к которым в том числе относятся сложные системы массового обслуживания, производственные, технологические, транспортно-логистические, инфокоммуникационные системы. Основным характерным свойством таких систем является принципиально модульная реконфигурируемая структура. При этом многокритериальная задача оптимизации функционирования сложноструктурированных реконфигурируемых систем заключается в определении оптимальных значений структурных параметров, а также параметров функциональных модулей, обеспечивающих достижение заданных значений соответствующих критериев качества.

Проблематика анализа и управления сложноструктурированными системами приводит к необходимости совершенствования средств математического описания структурных элементов систем массового обслуживания с внешними потоками событий и с упорядоченной дисциплиной распределения заявок между устройствами обслуживания. Следует отметить, что сложноструктурированные системы практически не поддаются математическому описанию с помощью аналитических методов ввиду чрезвычайной сложности циркулирующих случайных процессов и величин. Альтернативой здесь выступает аппарат имитационного моделирования.

Специфика имитационного моделирования сложноструктурированных систем рассмотрена в работах Б.Я. Советова, А.А. Самарского, Ю.И. Рыжикова, А.А. Емельянова, Р.М. Юсупова, И.М. Соболев, Н.П. Бусленко и др. Описание структурной организации и особенностей функционирования реконфигурируемых систем представлено такими учеными, как В.А. Мизюн, А.М. Царев, А.И. Дащенко, Y. Koren, A.G. Ulsoy, M.G. Mehrabi.

Особо следует отметить вычислительную сложность имитационных моделей сложноструктурированных систем, с точки зрения необходимых для их реализации машинных ресурсов, что ограничивает возможность эффективного их использования при принятии решений в темпе реального времени. Это требует разработки новых подходов к структурной организации имитационных моделей, обеспечивающих значительное сокращение в условиях их практического использования временных ресурсов и ресурсов памяти. Учитывая большое количество типовых процессов, реализуемых в рамках сложноструктурированных систем, представляется целесообразным каждому типу поставить в соответствие ограниченное число перенастраиваемых модулей моделирования.

В этой связи актуальность темы диссертационного исследования продиктована необходимостью дальнейшего развития аппарата имитационного моделирования на основе нового подхода к структурной организации имитационных моделей сложноструктурированных систем, реализующего модульный принцип построения на базе перенастраиваемых модулей типовых процессов, для обеспечения возможности их использования в оперативных условиях принятия управленческих решений.

Тема диссертационного исследования соответствует одному из основных научных направлений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»: «Вычислительные комплексы и проблемно-ориентированные системы управления».

**Целью диссертационного исследования** является разработка формализованного описания имитационных моделей сложноструктурированных систем на основе концепции перенастраиваемых модулей типовых процессов, обеспечивающей принятие управленческих решений в оперативных условиях.

**Задачи исследования.** Для достижения данной цели в работе поставлены следующие задачи:

- провести анализ перспективных направлений и принципов структурной организации имитационных моделей сложноструктурированных систем;
- предложить формализованное описание типовых процессов «обработки» и «сборки», с учетом их взаимодействия на уровне потоков заявок в рамках сложноструктурированных систем;
- разработать обобщенную структуру имитационной модели сложноструктурированной системы, обеспечивающую реализацию модульного принципа построения на основе выделения модулей типовых процессов «обработки» и «сборки»;
- разработать универсальную имитационную модель сложноструктурированной системы на основе модульного принципа построения, обеспечивающую формирование вариантов модели для конкретных условий и позволяющую проводить структурную оптимизацию объекта моделирования;
- разработать программный комплекс имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых систем на основе предложенной концепции перенастраиваемых модулей типовых процессов и осуществить его апробацию в условиях конкретного производства.

**Объект исследования:** сложноструктурированные системы, функционирующие в условиях реконфигурирования структуры потоков заявок.

**Предмет исследования:** математические методы формализованного описания и моделирования сложных систем.

**Методы исследования** основаны на использовании аппарата математического, имитационного, статистического моделирования, теории системного анализа, теории массового обслуживания, объектно-ориентированного программирования.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.**

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 диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

– модульный принцип структурной организации имитационных моделей реконфигурируемых систем, отличающийся комплексным использованием перенастраиваемых моделей типовых процессов, позволяющий значительно сократить затраты на разработку и настройку моделей сложных систем и оптимизировать их структуру в соответствии с заданными критериями;

– формализованное описание процессов функционирования типовых процессов типа обработки и сборки, отличающееся возможностью оперативной перенастройки с использованием обобщенных атрибутов и позволяющее отражать взаимодействие потоков заявок в рамках сложноструктурированных систем;

– универсальная имитационная модель сложноструктурированной системы, отличающаяся модульной перенастраиваемой структурой построения на основе технологии дискретно-событийного моделирования и позволяющая проводить комплексный статистический анализ процесса функционирования объекта моделирования;

– структура программного комплекса имитационного моделирования сложноструктурированных систем на основе перенастраиваемых модулей типовых процессов, отличающаяся учетом изменяющихся структурных параметров и позволяющая оперативно осуществлять структурную идентификацию, адаптацию и оптимизацию объекта моделирования.

**Практическая значимость работы.** Данные, формируемые по результатам имитационного моделирования на основе разработанных средств, позволяют провести комплексный анализ текущего состояния сложноструктурированной системы, спрогнозировать дальнейшее развитие ситуации и определить оптимальное решение для достижения наилучших ключевых показателей эффективности, за счет структурной и параметрической реконфигурации сложных систем массового обслуживания.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие положения:

1. Формализованное описание типовых процессов «обработки» и «сборки» дает возможность моделирования и анализа их взаимодействия на уровне потоков заявок в рамках сложноструктурированных систем и оперативной перенастройки в конкретных условиях.

2. Обобщенная структура имитационной модели сложноструктурированных систем обеспечивает оперативную реализацию модульного принципа формирования вариантов модели на основе типовых процессов «обработки» и «сборки».

3. Математическое описание универсальной имитационной модели сложноструктурированных систем с модульной реконфигурируемой структурой основано на представлении ее в качестве многоканальной многофазной системы массового обслуживания и включает средства оперативного проведения численной оптимизации параметров функционирования объекта моделирования.

4. Структура программного комплекса имитационного моделирования сложноструктурированных систем базируется на реализации информационного взаимодействия перенастраиваемых модулей типовых процессов.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований внедрены в производственной деятельности ЗАО «НИИ МЕХАНОТРОНИКИ-АЛЬФА-НЦ» в рамках системы поддержки принятия управленческих решений с целью организации серийного выпуска электроприводов для изделий специального назначения с учетом результатов моделирования процессов переноса в электромеханических исполнительных системах. Кроме того, результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах Воронежского государственного технического университета в рамках дисциплины: «Математическое моделирование объектов систем управления».

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях, семинарах и совещаниях: II Международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2017); V Международной научно-практической конференции «Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности» (Воронеж, 2017); XI Международной научно-технической конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» (Воронеж, 2017); XVI Международной научно-технической конференции «Новые технологии в научных исследованиях, управлении, производстве» (Воронеж, 2019); International Scientific Electric Power Conference (Saint Petersburg, Russian Federation, 23–24 May 2019); а также на научных семинарах кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах (2016-2021 гг.).

**Публикации.** Результаты выполненных в диссертации исследований изложены в 8 научных работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 публикация в издании, индексируемом в базе данных Scopus, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателю принадлежат: [1] – разработка математического описания перенастраиваемых типовых процессов и оптимизационной задачи; [2,6-8] – алгоритмическая и численная реализация имитационных моделей, проведение вычислительных экспериментов; [4] – проведение имитационных экспериментов на разработанной модели; [3,5] – разработка структуры программного комплекса и алгоритма информационного взаимодействия программных модулей.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Основная часть работы изложена на 150 страницах, включая 65 рисунков и 19 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведены цель, задачи, научная новизна, практическая значимость, результаты внедрения, а также основное содержание работы.

**Первая глава** посвящена анализу проблематики моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых систем. Рассмотрены методы математического моделирования сложноструктурированных систем, такие как аппарат сетей Петри, метод Монте-Карло, системная динамика, дискретно-событийное, агентное, когнитивное моделирование. В связи с тем, что моделирование сложноструктурированных систем с помощью аналитических методов крайне затруднительно, наиболее целесообразно в данном случае использование аппарата имитационного моделирования.

В работе приведен обзор и сравнительный анализ современных инструментальных средств имитационного моделирования сложноструктурированных объектов, и в качестве основы разрабатываемого программного комплекса выбрана универсальная среда имитационного моделирования AnyLogic. Важнейшим преимуществом данной системы является интегрированный принцип построения модели на базе параллельного использования различных математических методов моделирования.

Кроме того осуществлен анализ принципов структурной организации реконфигурируемых систем. Сложноструктурированные реконфигурируемые системы объединяют в единый комплекс основные и вспомогательные операции на основе ячеистой блочно-матричной структуры при параллельно-последовательном многокомпонентном материальном потоке заявок на обслуживание. Основными характеристиками реконфигурируемых систем являются переналаживаемая архитектура, высокая степень гибкости, модульная структура, интегрируемость, обратимость, диагностируемость, настраиваемость, масштабируемость. Неотъемлемым компонентом таких систем, обеспечивающим решение задач анализа функционирования систем, прогнозирования поведения системы в будущем и поиска оптимальных структурных параметров, являются программные средства имитационного моделирования.

Следует отметить, что существует большое количество разновидностей систем массового обслуживания (производственные, транспортные, инфокоммуникационные и т.д.) отличающихся структурой, масштабом, характером и особенностями протекания процессов, свойствами обслуживаемых заявок, перечнем и последовательностью операций, информационной средой взаимодействия и управления. Однако при решении конкретных задач, связанных с формализацией и моделированием таких систем, как правило, основные протекающие в их рамках процессы могут быть сведены к взаимодействию двух типовых процессов: «обработки» и «сборки».

**Вторая глава** посвящена разработке математических моделей сложноструктурированных систем, отличительной особенностью которых является интеграция процессов двух типов: «обработка» и «сборка». Обобщенная схема процесса функционирования сложноструктурированных систем представлена на рис. 1.

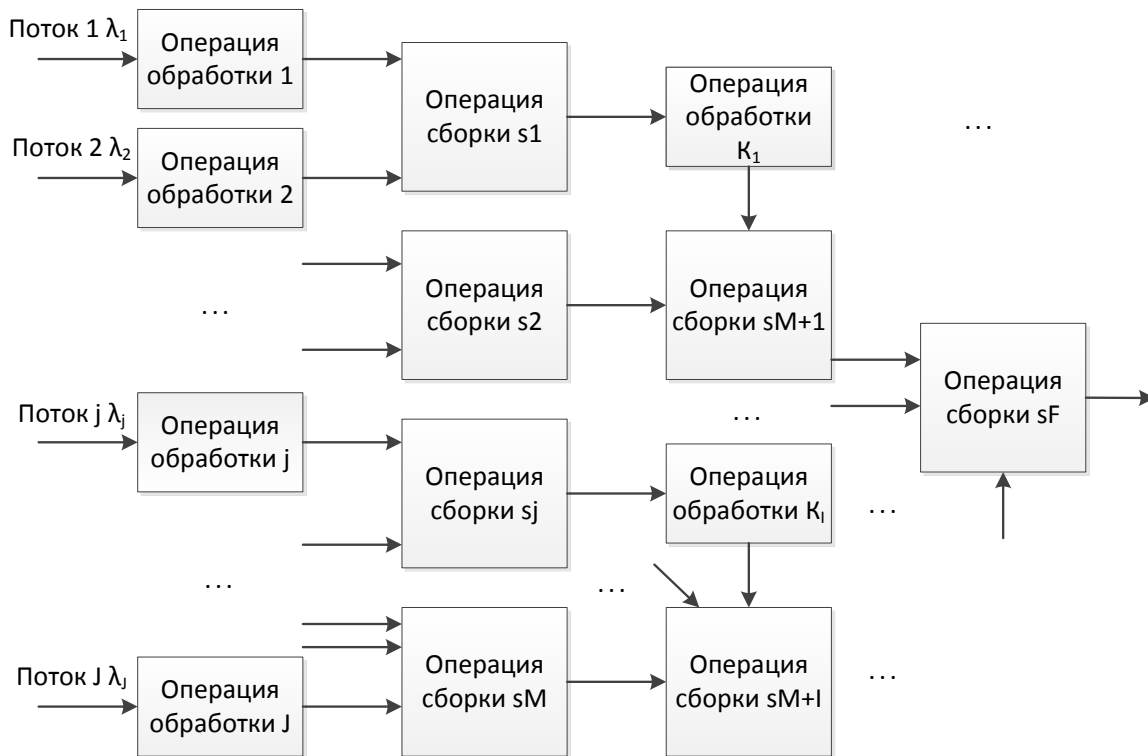


Рис. 1 –Обобщенная схема процесса функционирования сложноструктурированных систем

Момент начала обслуживания для операции типа «обработка» определяется формулой:

$$t^h = t^n + \tau^r + t^{ож} \quad (1)$$

где  $\tau^r$  - время подготовки оборудования к выполнению операции обработки,  $t^n$  – момент поступления заявки на обслуживание,  $t^h$  – момент начала обслуживания заявки,  $\tau^{оп}$  – длительность обслуживания,  $t^{ож}$  – время ожидания обслуживания. Ожидание возникает из-за занятости оборудования в момент поступления заявки.

Для описания формулы времени ожидания введено обозначение для длительности процесса обработки –  $\tau^{оп}$ . Эта величина обратно пропорциональна интенсивности обслуживания  $\mu$  (2).

$$\mu = \frac{1}{\tau^{оп}} \quad (2)$$

С учетом введенных обозначений, используя для описания процесса обработки аппарат теории массового обслуживания, получим (3):

$$t^{ож} = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\frac{\alpha^n}{n!}}{\sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} \cdot \frac{\alpha}{n} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{1 - \frac{\alpha}{n}}} \cdot \sum_{r=1}^m r \cdot \left(\frac{\alpha}{n}\right)^r, & \frac{\alpha}{n} \neq 1 \\ \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \cdot r \cdot m}{\sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} \cdot m}, & \frac{\alpha}{n} = 1, \end{cases} \quad (3)$$



где  $n$  – количество обслуживающих устройств для выполнения данной операции;  $m$  – ограничение на длину очереди (емкость накопителя);  $\alpha = \lambda/\mu$ .

Моменты  $t_1^n, t_2^n, t_3^n$  поступления первой, второй, третьей и т.д. заявок на операцию сборки  $O_i$  образуют входящий поток  $x_i(t)$ , который, в общем случае является нестационарным и зависит от времени  $t$ . Если данный поток является стационарным, то его интенсивность является константой и равна  $\lambda_i(t) = \lambda$ .

В случае если все места в очереди заняты, заявка получит отказ. Вероятность отказа определяется формулой:

$$P_{\text{отк}} = \begin{cases} \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \cdot \left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{\sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} \cdot \frac{\alpha}{n} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{1 - \frac{\alpha}{n}}}, & \frac{\alpha}{n} \neq 1 \\ \frac{\frac{\alpha^n}{n!}}{\sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} \cdot m}, & \frac{\alpha}{n} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Выходной поток  $y(t)$  заявок, прошедших обработку, определяется значениями  $t_1^n + \tau_1^{он}, t_2^n + \tau_2^{он}, \dots$ . Таким образом, процесс обработки математически выражается следующим образом:

$$y(t) = F(x(t), R, \mu, Sh(t)). \quad (5)$$

Здесь  $y(t)$  – выходной поток заявок,  $x(t)$  – входной поток заявок,  $R$  – ресурсы (устройства обслуживания), необходимые для выполнения операции,  $Sh(t)$  – расписание доступности ресурсов,  $\mu$  – интенсивность обслуживания.

Принципиальным отличием процессов сборки от процессов обработки является необходимость одновременного выполнения работ одновременно с несколькими заявками, поступающими с разных потоков. Моменты поступления на операцию сборки  $O_i$  данного узла всех комплектующих обозначены через  $t_1^n, t_2^n, \dots, t_M^n$ . Тогда момент начала сборки определяется следующим образом:

$$t^H = \max(t_1^n, t_2^n, \dots, t_M^n) + \tau^r + t^{ож}. \quad (6)$$

В случае если подготовка оборудования на сборку не требуется, то  $\tau^r = 0$ . В отличие от формулы (3), в данном случае невозможно описать аналитически величину  $t^{ож}$ , поскольку данный вид систем не исследовался с помощью теории массового обслуживания. В связи с этим, отсутствуют функциональные зависимости для определения  $t^H$ . Кроме того, неизвестна функциональная зависимость для определения вероятности отказа, и, в связи с этим, неясен характер выходного потока  $y(t)$  заявок, прошедших сборку. Таким образом, возникает необходимость в экспериментальном исследовании данных характеристик. В общем случае процесс сборки математически формализуется следующим образом:

$$y(t) = F(x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t), R, \mu, Sh(t)). \quad (7)$$

Здесь  $y(t)$  – выходной поток заявок,  $x_1(t), \dots, x_M(t)$  – входные потоки заявок,  $R$  – ресурсы, необходимые для выполнения операции,  $Sh(t)$  – расписание, определяющее доступность ресурсов,  $\mu$  – интенсивность обслуживания.

Формулы (1)-(7) – составляют математическую модель сложноструктурированной системы, отличительной особенностью которой является согласованное взаимодействие процессов двух типов: «обработка» и «сборка». На основании разработанной математической модели сформулирована соответствующая оптимизационная задача.

Пусть на вход системы поступают заявки, необходимые для изготовления изделия. Допустим, что, без ограничения общности, есть  $J$  входных потоков с интенсивностями  $\lambda_1, \dots, \lambda_J$ . Пусть система задана множеством пространственно-временных цепочек, каждая из которых представляет собой последовательность операций «обработки» и «сборки». Имеется  $K$  типов ресурсов, требуемых для выполнения операции  $O_i$ . Количество ресурсов каждого типа:  $R_1, R_2, \dots, R_k$ .

Известными в данной задаче являются интенсивность  $\mu_i$  выполнения каждой операции  $O_i$  (в общем случае длительности  $\tau_i^{op}$  выполнения операция являются случайными величинами с известным законом распределения); ограничения на длину каждой из очередей  $Q_i - L_i$  (емкость накопителя  $i$ -й фазы); план  $P$ , задающий требуемое количество обслуженных заявок на выходе системы в заданном временном диапазоне  $T_{plan}$ .

Необходимо определить параметры системы, чтобы обеспечить обслуживание количества заявок согласно плану  $P$ . Порядок операций в системе неизвестен, но последней выполняется финальная операция сборки. Тогда время пребывания заявки в системе  $t_F$  определяется по формуле:

$$t_F = t_F^H + \tau_F^{op} \dots \quad (8)$$

Здесь  $t_F^H$  – начало финальной операции сборки, которое определяется по формуле (6);  $\tau_F^{op}$  – длительность финальной операции сборки.

Тогда за время  $T_{plan}$  может быть обслужено количество заявок, которое определяется по формуле (9).

$$y_F = \begin{cases} \frac{T_{plan}}{t_F}, & \text{если } \frac{T_{plan}}{t_F} - \text{целое значение} \\ \left[ \frac{T_{plan}}{t_F} \right] - 1, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (9)$$

В этом случае, ограничение на количество обработанных заявок имеет вид (10). Ограничения на невозможность превышения максимально возможной длины очереди имеют вид (11).

$$y_F \geq P \quad (10) \quad \begin{cases} \text{len}(Q_1(t), K_1) \leq L_1 \\ \text{len}(Q_2(t), K_2) \leq L_2 \\ \dots \\ \text{len}(Q_F(t), K_F) \leq L_F \end{cases} \quad (11)$$

Здесь  $\text{len}(Q_i(t), K_i)$  – текущая длина очереди  $Q_i$  при условии, что операция выполняется количеством устройств  $K_i$ .

Введена в рассмотрение матрица  $vol$  размера  $F \times K$ , где  $K$  – количество типов ресурсов,  $F$  – число операций. Тогда для выполнения операции 1 необходимо  $vol_{11}$  ресурсов типа 1,  $vol_{12}$  ресурсов типа 2, ...,  $vol_{1K}$  ресурсов типа  $K$ . Аналогичным образом определяются объемы для остальных операций. Таким образом,  $vol_{ij}$  – это объем ресурсов типа  $j$ , требующийся для выполнения операции  $i$ . Ресурсные ограничения в данном случае будут выражаться системой уравнений (12).

В качестве целевых функций используются различные функциональные выражения. Одним из вариантов является минимизация каждого вида ресурсов при выполнении множества ограничений (10)-(12).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^F vol_{i1} \leq R_1 \\ \sum_{i=1}^F vol_{i2} \leq R_2 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^F vol_{iK} \leq R_K \end{array} \right. \quad (12) \quad \left\{ \begin{array}{l} R_1 \rightarrow \min \\ R_2 \rightarrow \min \\ \dots \\ R_F \rightarrow \min \end{array} \right. \quad (13)$$

Другим вариантом целевой функции является максимизация прибыли, получаемой за выпуск заданного числа изделий. Пусть в течение периода величиной  $T$  затраты на использование одного вида ресурсов типа  $i$  равны  $z_i$ , а прибыль, получаемая от выпуска одного изделия равна  $S$ . Тогда целевая функция выражается следующим образом (14):

$$S \cdot y_F(T) - \sum_{j=1}^K z_j \cdot R_j \rightarrow \max \quad (14)$$

Рассмотрена универсальная имитационная модель реконфигурируемой системы, характеризующаяся нестационарной пространственно-временной топологией. Способ математического описания модели основан на представлении системы в качестве многоканальной многофазной системы массового обслуживания. Модульная структура универсальной имитационной модели реконфигурируемой системы и функциональная схема перенастраиваемого типового модуля представлены на рис. 2а и 2б соответственно. Сплошными линиями на рис. 1 изображено направление основного материального потока, а пунктирными линиями показаны информационные потоки обратных связей.

Представленная модель позволяет решать задачу выбора оптимальных параметров системы, характеризующуюся следующей целевой функцией:

$$F(L_i, G_i) = \sum_{i=1}^F C_i(G_i) \cdot (L_i \cdot G_i)^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

где  $F$  – число фаз обслуживания;  $L_i$  ( $i=1,2,\dots,F$ ) – емкость накопителя  $i$ -й фазы;  $G_i$  ( $i=1,2,\dots,F$ ) – разность между поступившими и обслуженными заявками в  $i$ -й фазе за время  $T$ ;  $C_i(G_i)$  ( $i=1,2,\dots,F$ ) – «штрафные» коэффициенты.

$$C_i(G_i) = \begin{cases} a_i(G_i), & \text{если } L_i \geq G_i, \quad a_i(G_i) \geq 0, \\ b_i(G_i), & \text{если } L_i < G_i, \quad b_i(G_i) \geq 0, \end{cases} \quad (16)$$

Оптимизационная задача заключается в выборе значений емкостей накопителей ( $L_i$ ), обеспечивающих минимальное значение целевой функции (15).

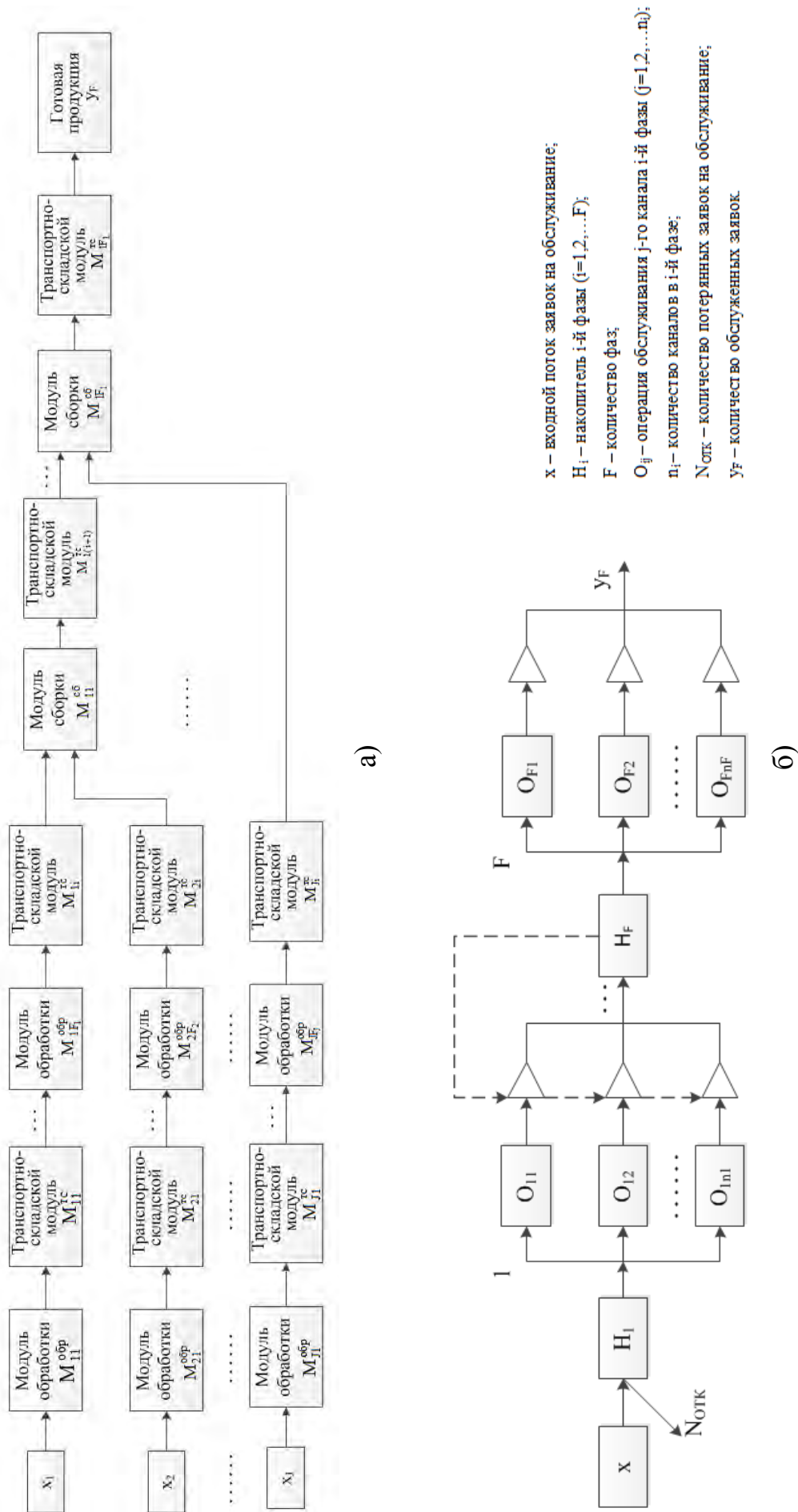


Рис. 2 – Модульная структура универсальной имитационной модели реконфигурируемой системы (а) и функциональная схема перенастраиваемого типового модуля (б)

Таким образом, разработана математическая модель сложноструктурированной системы, отличительной особенностью которой является согласованное взаимодействие процессов двух типов: «обработка» и «сборка», позволяющая оперативно перенастраивать структуру системы и осуществлять решение различных оптимизационных задач.

**Третья глава** посвящена анализу компонентов математической модели исследуемого класса сложноструктурированных систем с помощью вычислительного эксперимента на базе инструментов имитационного моделирования. Проведены вычислительные эксперименты для анализа параметров подсистемы обработки, сборки, подсистем смешанного типа, состоящих как из операций обработки, так и операций сборки. Проведен анализ выходного потока заявок, приведены решения оптимизационных задач поиска таких параметров, как максимальная длина очереди, при условии минимизации вероятности отказа.

Очередь перед операцией обработки возникает лишь в том случае, если в момент поступления заявки устройство занято. Для стационарного входного потока заявок используется формула (4), описывающая вероятность отказа. Также использована формула, описывающая среднюю длину очереди:

$$\bar{r} = \begin{cases} \frac{\frac{\alpha^n}{n!}}{\sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} \cdot \frac{\alpha}{n} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{n}\right)^m}{1 - \frac{\alpha}{n}}} \cdot \sum_{r=1}^m r \cdot \left(\frac{\alpha}{n}\right)^r, \frac{\alpha}{n} \neq 1 \\ \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \cdot r \cdot m}{\sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} \cdot m}, \frac{\alpha}{n} = 1. \end{cases} \quad (17)$$

В работе подробно проанализирована специфика процессов типа «сборка». На вход системы поступает несколько потоков заявок с интенсивностями  $\lambda_1, \dots, \lambda_K$ . Выполнение операции сборки запускается после того, как все заявки поступили в систему. Каждый поток характеризуется очередью  $Q_i$ , ограниченной некоторым значением  $\text{len}(Q_i)$ . Необходимо проанализировать вероятности отказа.

Пусть в общем случае на операцию сборки поступает  $K$  потоков заявок с интенсивностями  $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_K(t)$  (потоки в общем случае нестационарны). Тогда для того, чтобы в произвольном интервале  $[T, T+\Delta T]$  среднее количество деталей с разных потоков совпадало, необходимо выполнение следующего условия:

$$\int_T^{T+\Delta T} t \cdot \lambda_1(t) dt = \dots = \int_T^{T+\Delta T} t \cdot \lambda_K(t) dt \quad (18)$$

В случае если для сборки необходимо  $n_1$  заявок первого типа,  $n_2$  – второго и т.д., то формула (18) преобразуется к следующему виду:

$$n_1 \int_T^{T+\Delta T} t \cdot \lambda_1(t) dt = \dots = n_K \int_T^{T+\Delta T} t \cdot \lambda_K(t) dt \quad (19)$$

В случае дискретных систем интенсивности  $\lambda_i(t)$ ,  $i=1, \dots, K$  заданы в виде таблиц (см. таблицу 1) для каждого из потоков  $1, 2, \dots, K$ . Здесь  $j_i$ ,  $i=1, \dots, K$  – коли-

чество временных интервалов в диапазоне  $[T, T+\Delta T]$ , в пределах которых значение интенсивности  $i$ -ого потока менялось.

Таблица 1

Значения интенсивности  $i$ -ого потока заявок

| Временной интервал      | $[t_{i1}, t_{i2}]$ | $[t_{i2}, t_{i3}]$ | ... | $[t_{ij}, t_{ij+1}]$ |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-----|----------------------|
| Значение $\lambda_{ij}$ | $\lambda_{i1}$     | $\lambda_{i2}$     | ... | $\lambda_{ij}$       |

Применительно к дискретным моделям условие (18) выглядит следующим образом (20):

$$\begin{aligned} & \lambda_{11}(t_{12} - t_{11}) + \lambda_{12}(t_{13} - t_{12}) + \dots + \lambda_{1j_1}(t_{1j_1+1} - t_{1j_1}) = \\ & \lambda_{21}(t_{22} - t_{21}) + \lambda_{22}(t_{23} - t_{22}) + \dots + \lambda_{2j_2}(t_{2j_2+1} - t_{2j_2}) = \dots \\ & \dots \\ & = \lambda_{k1}(t_{k2} - t_{k1}) + \lambda_{k2}(t_{k3} - t_{k2}) + \dots + \lambda_{kj_k}(t_{kj_k+1} - t_{kj_k}) \end{aligned} \quad (20)$$

В связи с этим, в дальнейшем исследовалась модель с одинаковыми интенсивностями входных потоков. Для каждого потока установлена очередь, максимально возможная длина которой последовательно увеличивалась. Для каждого текущего значения длины выполнялся прогон, по статистике которого определяются вероятности отказов по формуле (21) и средняя длина очереди.

$$P_{\text{отк}} = \frac{\text{количество отказов}}{\text{общее число заявок}} \quad (21)$$

В работе исследованы особенности функционирования систем смешанного типа. На устройство, которое осуществляет финальную сборку, подавались два потока заявок. Первый поток заявок образуется в результате сборки комплектов двух входящих потоков одинаковой интенсивности. Интенсивность сборки равна интенсивностям входного потока заявок. Второй поток является простейшим стационарным, идентичным двум входным потокам.

По результатам серии проведенных экспериментов для разного числа входящих потоков установлено, что характеры зависимости вероятности отказа от емкости накопителей (рис. 3.а) и средней длины очередей от емкости накопителей для операций типа «сборка» аналогичны соответствующей зависимости для операции типа «обработка», а вероятность отказа для каждого отдельного потока при увеличении числа потоков перед операцией сборки увеличивается пропорционально соответствующей величине (рис. 3.б).

Проведен вычислительный эксперимент по исследованию специфики синхронизированного потока заявок, возникающего после комплектования необходимых заявок. Структура исследуемого потока заявок представлена на рис. 4. Для анализа результатов вычислительного эксперимента сформирована гистограмма по полученным данным и проведена проверка ее на равномерность (выбрано число интервалов, равное 10). При разбивке первых 1500 значений на интервалы получена гистограмма, представленная на рис. 5. Вид гистограммы позволяет сделать вывод о равномерном распределении исследуемой случайной величины и, как следствие, о стационарности исходящего потока.

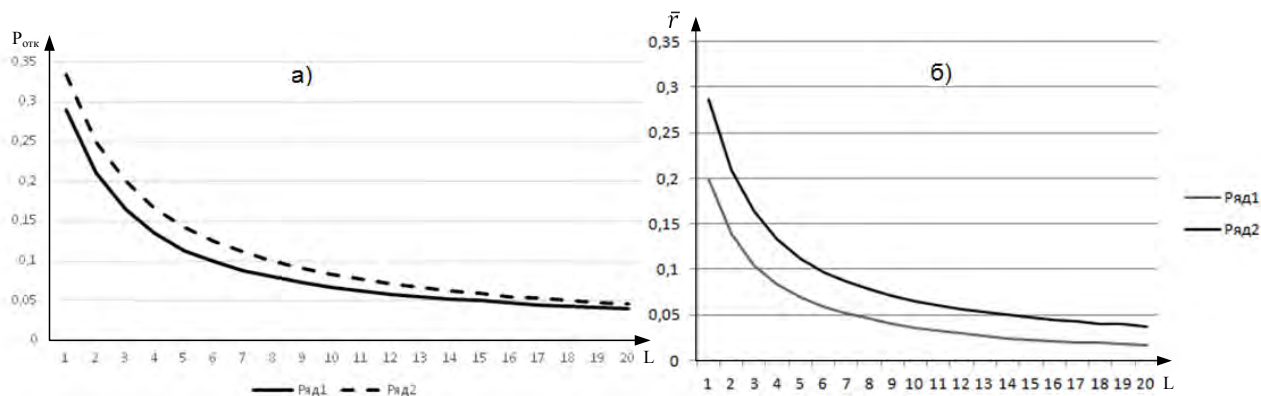


Рис. 3 – Результаты вычислительных экспериментов

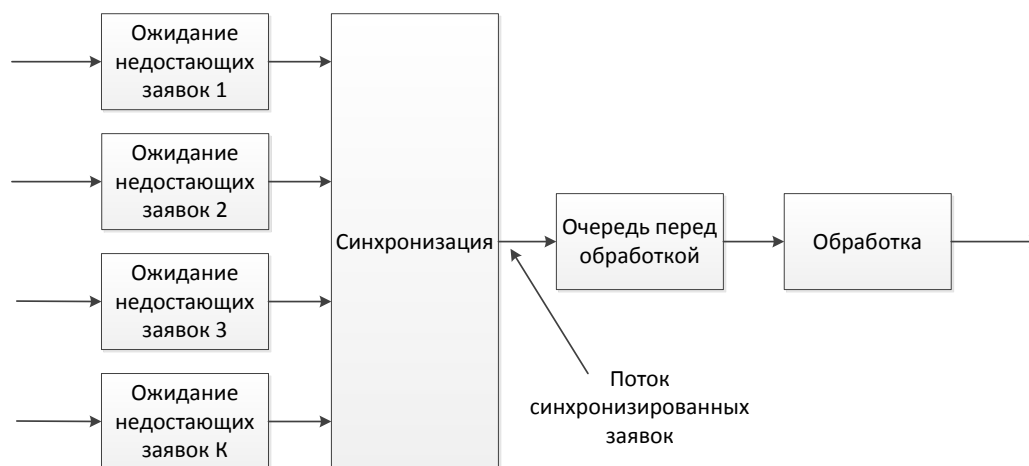


Рис. 4 – Структура исследуемого потока заявок

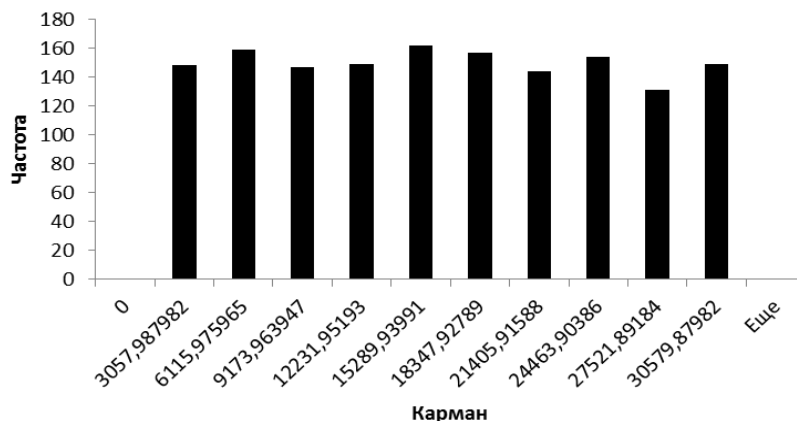


Рис. 5 – Данные гистограммы первых 1500 значений

Далее средствами имитационного моделирования решается многокритериальная задача минимизации вероятностей отказа и минимизация емкостей накопителей для операций типа «сборка» (22).

$$\begin{cases} L_1 \rightarrow \min \\ \dots \\ L_F \rightarrow \min \\ P_{\text{отк}_1} \rightarrow \min \\ \dots \\ P_{\text{отк}_F} \rightarrow \min \end{cases} \quad (22)$$

Пример настройки некоторых свойств модели для решения оптимизационной задачи и ее результаты приведены на рис. 6.

**Optimization - Оптимизационный эксперимент**

Имя: Optimization  Исключить

Агент верхнего уровня: Main

Целевая функция:  минимизировать  максимизировать

`root.lenq1+root.lenq2+root.lenq3`

Количество итераций: 500

Автоматическая остановка

Максимальный размер памяти: 512 Мб

Создать интерфейс

**Требования**

Требования (проверяются после "прогона" для определения того, допустимо)

| Вкл.                                | Выражение      | Тип | Гр... |
|-------------------------------------|----------------|-----|-------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | root.ver_otk_1 | <=  | 0.05  |
| <input checked="" type="checkbox"/> | root.ver_otk_2 | <=  | 0.05  |
| <input checked="" type="checkbox"/> | root.ver_otk_3 | <=  | 0.05  |

**Эксперименты : Optimization**

|                  | Текущее | Лучшее    |
|------------------|---------|-----------|
| Итерация:        | 501     | 214       |
| Функционал:      | 34      | 6         |
| <b>Параметры</b> |         | Copy best |
| ver_otk_1        | 0.09    | 0.05      |
| ver_otk_2        | 0.35    | 0.05      |
| ver_otk_3        | 0       | 0.05      |
| lenq1            | 5       | 12        |
| lenq2            | 4       | 9         |
| lenq3            | 20      | 13        |

Рис. 6 – Результаты вычислительного эксперимента

Таким образом, в работе проведена серия вычислительных экспериментов, позволяющая оценить характер поведения различных характеристик для подсистем типа обработки, сборки и смешанных систем, а также найти оптимальное решение многокритериальной задачи (22).

**В четвертой главе** представлена структура и описание программного комплекса имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых систем на основе перенастраиваемых модулей типовых процессов, разработанного на базе инструментальной среды разработки AnyLogic (рис. 7). Структура универсальной модели сложноструктурированной системы создается на базе моделей типовых процессов «обработки» и «сборки». Все элементы и подсистемы создаваемых моделей являются классами языка JAVA. Исходными данными для моделирования в данном программном комплексе являются состав ресурсов, обеспечивающих выполнение операций; пространственно-временная схема обслуживания заявок; порядок и интенсивность поступления заявок на обслуживание; расписание доступности ресурсов; емкости накопителей; масштаб и интервал времени моделирования.

При формировании перенастраиваемых моделей типовых процессов, пользователь использует интегрированную СУБД, включающую в себя библиотеки справочных данных и готовых моделей типовых процессов, а также вводит исходные данные для конкретной модели. Затем в среде AnyLogic посредством встроенного графического языка описания объекта осуществляется синтез структуры, параметризация и инициализация модели, формируются логические связи и функциональные зависимости между элементами и параметрами, описываются динамические характеристики модели элементы типовой настройки.



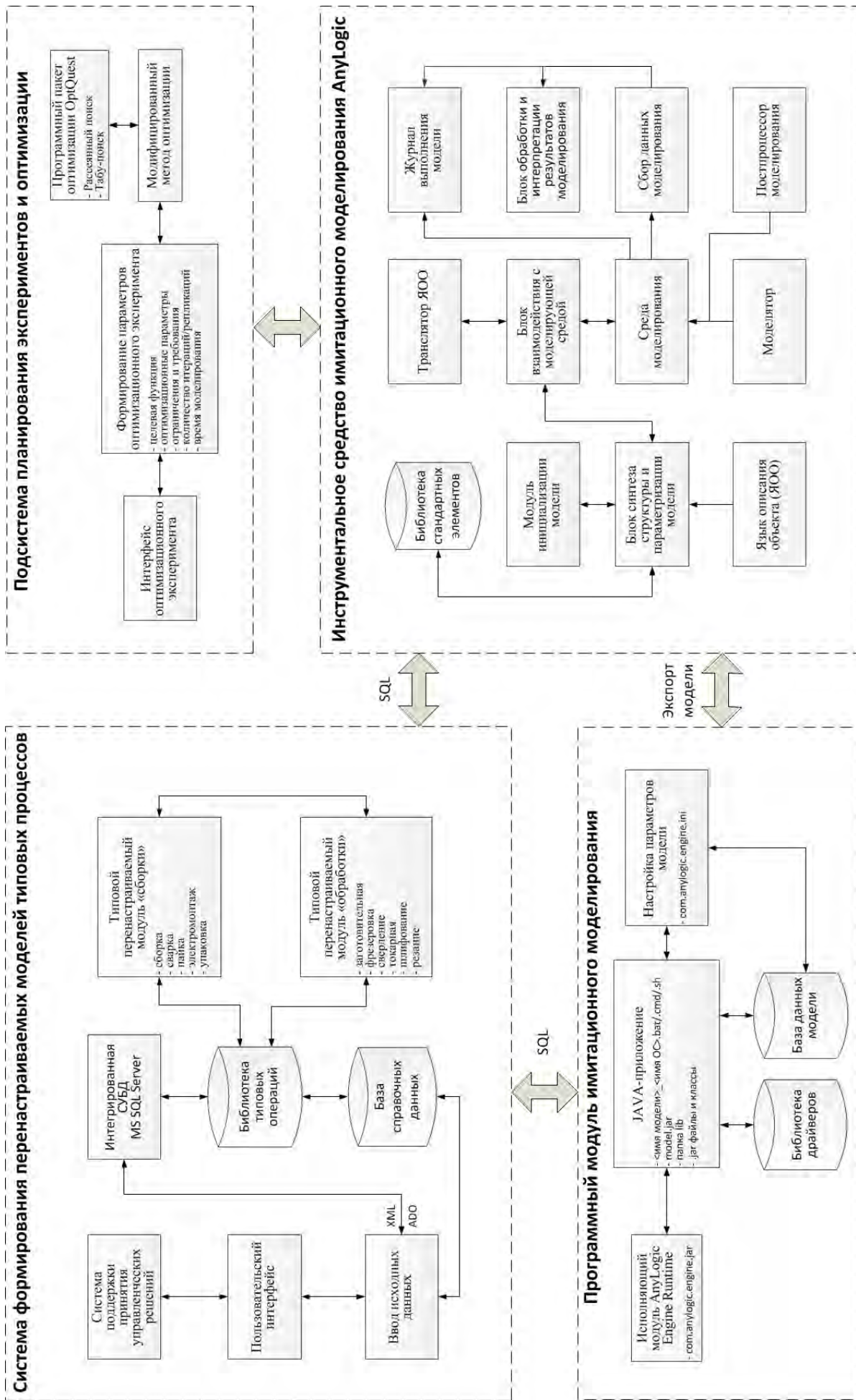


Рис. 7. Структура программного комплекса имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых систем на основе моделей типовых процессов

При этом используются библиотеки, сгруппированные по методам моделирования и объектовой области применения, которые при необходимости могут быть расширены пользователем. После формирования структуры и параметров модели осуществляется переход к среде моделирования. Посредством блока взаимодействия с моделирующей средой выполняется настройка параметров запуска эксперимента единица модельного времени, время начала и завершения хода моделирования, количество итераций, значения параметров, действия при запуске и завершении «прогона».

Для решения оптимизационной задачи пользователь задает параметры оптимизационного эксперимента: целевая функция, управляемые параметры, требования, ограничения, количество итераций/репликаций модели, модельное время, план вычислительного эксперимента. Стоит отметить, что для решения оптимизационной задачи в разработанном программном комплексе использован модифицированный метод поиска на основе эволюционного метода рассеивания с применением идей табу-поиска.

Среда моделирования обеспечивает взаимодействие с пользователем в процессе имитационных экспериментов, данные о ходе протекания которых записываются в журнал выполнения модели. Цикл имитационных «прогонов» модели повторяется до тех пор, пока не будет выполнен план экспериментов. Файл данных модели в случае необходимости может быть экспортирован в отдельное JAVA-приложение.

В работе разработана структура базы данных системы формирования перенастраиваемых модулей типовых процессов программного комплекса на основе логической модели «сущность-связь» при допущении, что для решаемой задачи нет разграничения между ресурсами-людьми и ресурсами-оборудованием, в связи с чем они объединены в единую таблицу.

На основании исходных данных в меню инициализации модели создается структура системы, количество и типы модулей обработки и сборки, средства их перенастройки, элементы, классы и связи между ними. Также здесь конфигурируются режим модельного времени (реальный или виртуальный с заданной скоростью), начальная и конечная точки запуска модели.

В качестве примера в работе рассмотрена реализация имитационной модели сборочно-монтажного цеха (рис. 8). Производственная система содержит в своем составе следующие ресурсы:  $R_1$  сборочных роботов,  $R_2$  слесарей-сборщиков,  $R_3$  модулей автоматического монтажа,  $R_4$  монтажников,  $R_5$  регулировщиков и обеспечивает функционирование процессов типа «обработка» и процессов типа «сборка» в соответствии с заданными условиями. Система имеет реконфигурируемую пространственную топологию. Требуется произвести расчет оптимальной структуры технологической системы для выполнения годового плана по выпуску блоков электрических приводов в количестве  $P$  штук.

Целевой функцией является минимизация состава производственных ресурсов. Область допустимых решений ограничена плановым объемом выпуска изделий, отсутствием отказов в обслуживании заявок и ограничениями по максимальному количеству каждого вида ресурсов.

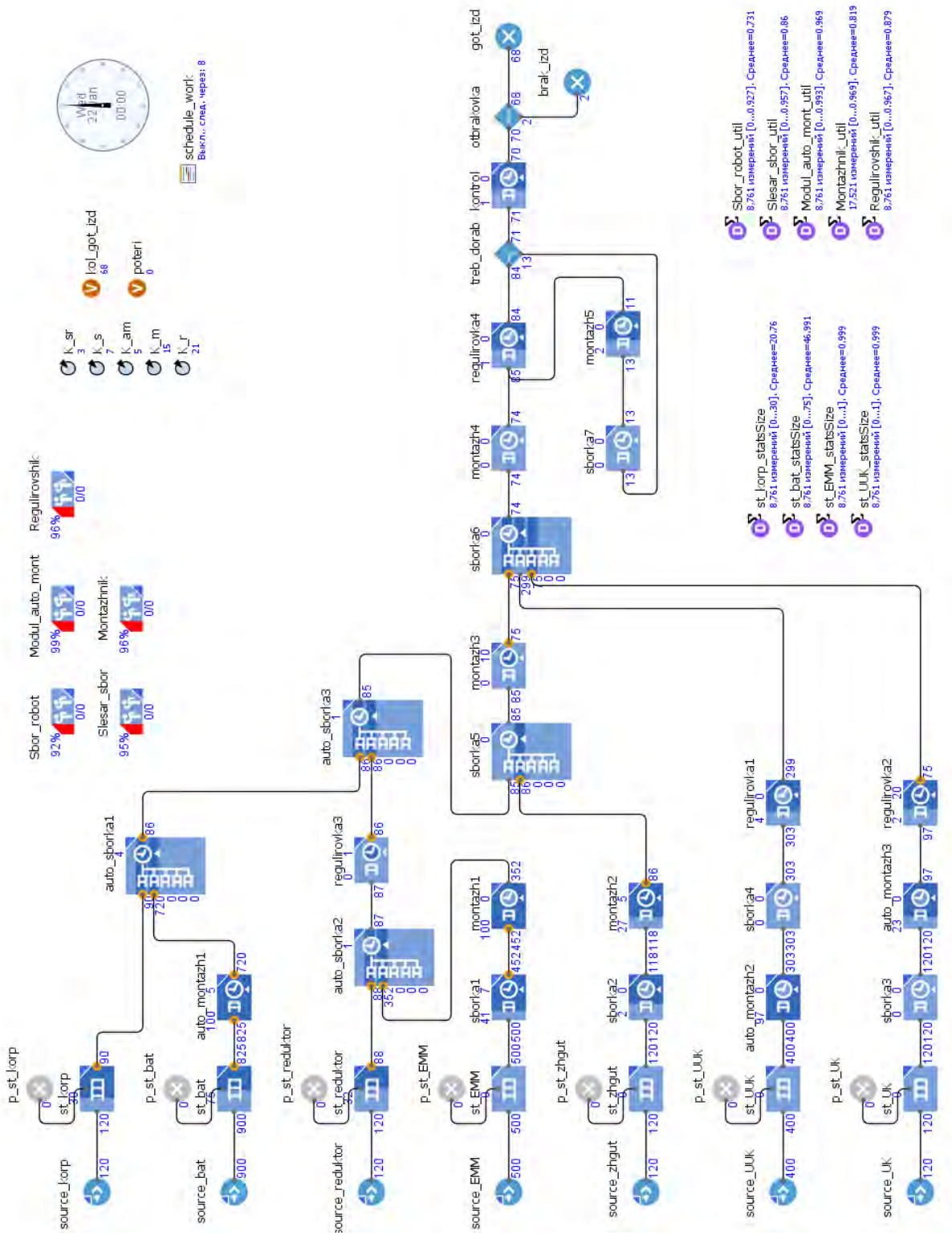


Рис. 8 – Имитационная модель автоматизированного сборочно-монтажного цеха

При этом значения количества используемых ресурсов выбраны в качестве управляемых переменных. Для решения поставленной задачи период имитационных «прогнозов» модели принят равным 1 году. За единицу модельного времени принят 1 час. В ходе оптимизационного эксперимента было проведено 3500 итераций. Оптимальное решение было получено на 2231-й итерации:  $R_1 = 3$ ,  $R_2 = 7$ ,  $R_3 = 5$ ,  $R_4 = 15$ ,  $R_5 = 21$ . Основные показатели функционирования производственного модуля сборки, полученные по итогам оптимизационного эксперимента, сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Основные показатели функционирования производственного модуля сборки

| Наименование показателя               | Обозначение в модели | Значение |
|---------------------------------------|----------------------|----------|
| Интенсивность прибытия заявок, шт./ч  | source_korp          | 0.1      |
|                                       | source_bat           | 1        |
|                                       | source_reduktor      | 0.1      |
|                                       | source_EMM           | 0.4      |
|                                       | source_zhgut         | 0.1      |
|                                       | source_UUK           | 0.35     |
|                                       | source_UK            | 0.2      |
| Емкость накопителя, шт.               | st_korp              | 50       |
|                                       | st_bat               | 200      |
|                                       | st_reduktor          | 100      |
|                                       | st_EMM               | 100      |
|                                       | st_zhgut             | 50       |
|                                       | st_UUK               | 100      |
|                                       | st_UK                | 50       |
| Коэффициент загрузки рабочих ресурсов | Sbor_robot_util      | 0.731    |
|                                       | Slesar_sbor_util     | 0.86     |
|                                       | Modul_auto_mont_util | 0.969    |
|                                       | Montazhnik_util      | 0.819    |
|                                       | Regulirovshik_util   | 0.879    |
| Количество готовых изделий, шт.       | got_izd              | 68       |
| Количество забракованных изделий, шт. | brak_izd             | 2        |
| Количество отказов                    | poteri               | 0        |

В результате проведения имитационных экспериментов получены оптимальные значения параметров производственной системы, обеспечивающие выполнение годового плана по выпуску продукции с наименьшими материальными затратами и потерями. При этом расчетное значение времени ожидания потоков заявок снижено в среднем до 5 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Произведён анализ перспективных направлений и принципов структурной организации имитационных моделей сложноструктурированных систем.

2. Предложено формализованное описание типовых процессов «обработки» и «сборки» с учетом их взаимодействия на уровне потоков заявок в рамках сложноструктурированных реконфигурируемых систем.

3. Разработана обобщенная имитационная модель сложноструктурированной системы, обеспечивающая реализацию модульного принципа построения вариантов модели на основе типовых процессов «обработки» и «сборки».

4. Разработана структура универсальной имитационной модели сложноструктурированных реконфигурируемых систем на основе модульного принципа построения, математическое описание которой представлено в виде многоканальной многофазной системы массового обслуживания, позволяющая оперативно проводить структурную оптимизацию объекта моделирования.

5. Разработан программный комплекс имитационного моделирования сложноструктурированных систем на основе предложенной концепции перенастраиваемых модулей типовых процессов и осуществлена апробация в условиях конкретного производства.

6. Элементы программного обеспечения прошли государственную регистрацию в реестре Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент).

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### **Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Лащенов, Д.П. Математическое моделирование и оптимизация сложноструктурированных объектов / Д.П. Лащенов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. № 4.– DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.017.

2. Лащенов, Д.П. Имитационное моделирование гибкой производственной системы на базе автоматизированного сборочно-монтажного цеха / Д.П. Лащенов, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. - Т. 15. № 3. – С. 51-56.

3. Лащенов, Д.П. Программный комплекс имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых объектов на основе моделей типовых производственных систем / Д.П. Лащенов, В.Л. Бурковский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. № 3.– DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.001.

#### **Научные публикации, индексируемые в Scopus**

4. Mathematical modeling of thermal processes in small-sized DC electric drives / Yu.V.Pisarevsky, A.I.Borisova, V.L.Burkovsky, A.Yu.Pisarevsky, V.B.Fursov, D.P. Laschenov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 643. – Issue 1. – Номер статьи 012002.

#### **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ**

5. Лащенов, Д.П. Программный комплекс имитационного моделирования сложноструктурированных реконфигурируемых объектов на основе моделей типовых производственных систем: свидетельство о государственной реги-

страции программы для ЭВМ / Д.П. Лащенко, В.Л. Бурковский. М.: ФИПС, 2020. № 2020617738 от 10.07.2020 г.

### **Статьи и материалы конференций**

6. Лащенко, Д.П. Имитационное моделирование технологических объектов интегрированных производственных систем / Д.П. Лащенко, В.Л. Бурковский // Современные технологии в науке и образовании. – Рязань, – 2017. – Т. 1. – С. 38-42.

7. Лащенко, Д.П. Имитационное моделирование типовых систем сборки в рамках интегрированных производственных комплексов / Д.П. Лащенко, В.Л. Бурковский // XVI Международная науч.-техн. конф. Новые технологии в научных исследованиях, управлении, производстве (НТ-2019). – Воронеж, – 2019. – С. 10-15.

8. Лащенко, Д.П. Имитационное моделирование гибкой производственной системы металлообработки / Д.П. Лащенко, В.Л. Бурковский // XVI Международная науч.-техн. конф. Новые технологии в научных исследованиях, управлении, производстве (НТ-2019). – Воронеж, – 2019. – С. 15-18.

Подписано в печать 19.02.2021.

Формат 60x84 1/16. Усл.-печ. л. 1.3. Бумага писчая.

Тираж 80 экз. Заказ № 96.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ

394026 Воронеж, Московский просп., 14