

*На правах рукописи*



**ФАМ Ань Минь**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ  
РЕСУРСОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» на кафедре систем автоматизированного проектирования вычислительных средств.

**Научный руководитель:** **Перепелкин Дмитрий Александрович**, доктор технических наук, доцент, декан факультета вычислительной техники ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

**Официальные оппоненты:** **Кравец Олег Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных и вычислительных систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО ВГТУ), г. Воронеж

**Тарасов Вениамин Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГБОУ ВО ПГУТИ), г. Самара

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза

Защита диссертации состоится « 29 » июня 2022 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте [www.rsreu.ru](http://www.rsreu.ru).

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



Д.А. Перепелкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время технологии Интернета вещей (Internet of Things, IoT) становятся все более популярными. В связи с быстрым ростом количества устройств, подключенных к IoT-сети, необходимо оперативно передавать и обрабатывать большие потоки информации. Поэтому показатели сетевых устройств по скорости обработки информации, передаче данных и эффективности распределения ресурсов нуждаются в улучшении. Также стоит заметить, что стоимость обновления оборудования в IoT-сети достаточно высокая.

Текущая система связи между устройствами IoT-сети построена на основе сетевых устройств инфраструктуры Интернет. Промышленные сети Интернета вещей (Industrial Internet of Things, IIoT) имеют более разнородные устройства, где память и вычислительные мощности считаются важными ресурсами. Промышленная сеть представляется в виде сети передачи данных, связывающей физические устройства, различные датчики, промышленные контроллеры и компьютеры, используемые в промышленной автоматизации. Путем реорганизации и программирования процессов обработки информации, передачи данных и распределения ресурсов на существующих устройствах может быть достигнута значительная экономия затрат на обновление оборудования. Оценка и анализ процессов планирования и распределения ресурсов способствуют повышению эффективности функционирования промышленных сетей.

Для анализа и оценки проектов со сложной стохастической структурой в промышленных сетях часто применяется математический аппарат GERT-сетей, благодаря наличию следующих преимуществ: вероятностных ветвлений, допущению возвратов к ранее выполненным операциям и использованию циклов. Промышленные устройства часто характеризуются ограниченными ресурсами (например, памятью, вычислительной мощностью, пропускной способностью и многими другими), что может создавать множество проблем, связанных с нехваткой ресурсов. Следовательно, для управления такими промышленными устройствами требуются технологии, способные управлять ограниченными ресурсами. Расширение функциональных возможностей классической GERT-сети путем добавления параметра ресурса в модель GERT-сети позволяет одновременно проводить оценку и анализ вероятностно-временных и вероятностно-ресурсных характеристик, а также эффективно решать задачи управления разнородными ресурсами в промышленных сетях.

Проведенный анализ и исследование предметной области показал, что модели планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях (в том числе и GERT-модели) с функциональными зависимостями между временным и ресурсным величинами не освещены в научной литературе. Специфика GERT-сетей такова, что могут быть рассмотрены не только вероятностно-временные соотношения, но и вероятностно-ресурсные зависимости. Резюмируя все сказанное, можно считать тему данной диссертации актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Большой вклад в решение задачи планирования и распределения разнородных ресурсов в вычислительных системах и промышленных сетях внесли российские ученые Антамошкина Е.А., Абдуллаев Д.А., Амирсаидов У.Б., Бусленко Н.П., Вентцель Е.С., Воропаев В.И.,

Девятков В.В., Демкин И.В., Голенко-Гинзбург И., Емельянов А.А., Захаров Г.П., Корячко В.П., Шибанов А.П., Кулагин В.П., Волчихин В.И., Зинкин С.А., Леохин Ю.Л., Тарасов В.Н., Каргашевский В.Г., Кравец О.Я., Ласло З., Любкин С.М., Максимов Н.А., Овчаров Л.А., Осипчук О.К., Резер В.С., Ситняковский С.Л. А также зарубежные: Анго А., Бертсекас Д, Галлагер Р., Дейкстра Э., Кнут Д.Э. Клейнрок, Л., Феллер В., Шрайбер Т.Дж., Филлипс Д., Alavi S.H., Antkiewicz R., Bagherpour M., Bevrani H., Dyk M., Fatemi Ghomi T.F., Feili H., Jose K.P., Iranzadeh S., Youshanloi K.R., Hashemin S.S., Kasprzyk R., Najgebauer A., Najmoddin M., Pierzchalam D., Pooja Mohan P., Pritsker A.A.B., Tarapata Z., Wyrozebski P., Wyrozebska A., Wirth N.

**Целью исследований** является повышение эффективности информационных и технологических процессов, сокращение сроков проектирования и уменьшение затрат на эксплуатацию оборудования, а также расширение функциональных возможностей моделей GERT-сетей посредством разработки математических моделей, методов, алгоритмов и комплекса программ компьютерного моделирования процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- провести исследование и анализ известных подходов планирования и распределения ресурсов в промышленных сетях;
- обосновать использование и применение математического аппарата GERT-сетей для исследования процессов планирования и распределения разнородных в промышленных сетях;
- разработать математические модели, методы и алгоритмы планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей;
- разработать набор методик планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных GERT-сетях;
- выполнить компьютерное моделирование процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях.

**Объект исследования:** процессы планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях.

**Предмет исследования:** средства математического и компьютерного моделирования промышленных сетей с разнородными ресурсами.

**Методология и методы исследования.** Методология связана с анализом логической структуры методов исследования и построения теоретических положений диссертации, истинности и аргументированности результатов. Положения, выводы и экспериментальные результаты диссертационной работы получены с использованием: теории графов, полумарковских моделей, методов нахождения распределений выходных характеристик GERT-сетей, теории вероятностей, теории аналитических функций комплексного переменного, методов компьютерного моделирования.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам:

п.1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»;

п.2 «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей»;

п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»;

п.8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования».

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

- математические модели, численный метод и алгоритмы назначения пары операций для выделения ресурсов в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей, отличающиеся наличием обобщенного подхода для достижения любого узла в модели GERT-сети и позволяющие определить вероятность двух операций, последовательно выполненные одной единицей ресурса;

- математические модели и алгоритмы планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях с упорядоченными наборами операций, позволяющие получать совокупность вариантов предоставления ресурсов для операций, принадлежащих одному упорядоченному набору с определенной вероятностью завершения;

- математические модели определения вероятностно-ресурсных характеристик с учетом важности выделяемых ресурсов в промышленных сетях, отличающиеся возможностью применения функциональных зависимостей между случайными величинами и позволяющие одновременно вычислять вероятностно-временные и вероятностно-ресурсные характеристики в условиях ограничения по времени;

- методики планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных сетях, позволяющие повысить эффективность информационных и технологических процессов промышленных телекоммуникационных сетей;

- комплекс программ компьютерного моделирования процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей, отличающийся учетом параметров ресурсов в модели GERT-сети и позволяющий сократить сроки их проектирования и анализа.

**Положения, выносимые на защиту:**

1 Математические модели, метод и алгоритмы назначения пары операций для выделения ресурсов в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей.

2 Математические модели и алгоритмы планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях с упорядоченными наборами операций.

3 Математические модели определения вероятностно-ресурсных характеристик с учетом важности выделяемых ресурсов в промышленных сетях.

4 Методики планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных сетях.

5 Комплекс программ компьютерного моделирования процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях.

**Степень достоверности результатов.** Степень достоверности положений и выводов диссертации определяется:

- отсутствием противоречий с известными научными положениями;

- корректностью полученных математических результатов;
- сравнением результатов, полученных численными методами, с результатами, полученными на основе теории аналитических функций;
- сравнением результатов моделирования, применения численных методов и комплекса программ с результатами реального проектирования.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** На основе разработанных математических моделей, численных методов, алгоритмов созданы инженерные методики и комплекс программ расчета временных и ресурсных характеристик в промышленных сетях. Теоретическая значимость работы заключается:

- в разработке моделей, методов и алгоритмов назначения упорядоченного набора операций в GERT-сети;
- в создании математических моделей, методов и алгоритмов использования ресурсов с функционально зависимыми случайными величинами в GERT-сетях;
- в создании методик планирования и распределения разнородных ресурсов с функционально зависимыми случайными величинами в промышленных телекоммуникационных сетях.

Диссертация имеет практическую значимость при проектировании промышленных сетей со сложной структурой и может быть использована в учебном процессе. В диссертации разработана система компьютерного моделирования процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях, которая состоит из трех программных компонентов:

- программа TaskTimeModeler предназначена для расчета временного интервала между операциями;
- программа TasksReorderingModeler позволяет выполнить планирование и распределение разнородных ресурсов с упорядоченным набором операций;
- программа ResourceModeler используется для планирования и распределения разнородных ресурсов с применением функциональных зависимостей.

Практическая значимость работы подтверждается актами о внедрении в организациях ООО «Технология и торговля Мегалайн» (Вьетнам) и ООО «Вьетнамское Программное Обеспечение и Технологическое Развитие» (Вьетнам), а также в учебном процессе на кафедре САПР ВС РГРТУ.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях: V-VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (г. Рязань, 2020, 2021); XXIV-XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, 2019, 2020, 2021); IV-V Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» (г. Рязань, 2021, 2022); 17th International Symposium «Problems of Redundancy in Information and Control Systems» (REDUNDANCY) (Moscow, 2021), 14th International Conference ELEKTRO (Krakow, Poland, 2022).

**Публикации.** По итогам проведенных исследований опубликовано 17 научных работ: в том числе 6 статей в изданиях из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК; 2 статьи в изданиях, входящих в международные базы научного цитирования Web of Science и Scopus; 7 докладов на международных и

всероссийских научно-технических конференциях; 1 статья в научно-техническом журнале; 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Роспатент.

**Реализация и внедрение результатов работы.**

- в ООО «Технология и торговля Мегалайн» (Вьетнам);
- в ООО «Вьетнамское Программное Обеспечение и Технологическое Развитие» (Вьетнам);
- в учебном процессе на кафедре САПР ВС РГРТУ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, 2 приложений, изложенных на 164 страницах (включая 92 рисунка и 11 таблиц). Список литературы содержит 108 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследований, раскрыта научная новизна работы и ее теоретическая и практическая значимость, представлены основы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ и исследование известных подходов планирования и распределения ресурсов в промышленных сетях. Рассмотрены концепция, архитектуры, технологии, протоколы, приложения, преимущества и основные проблемы Интернета вещей. Представлены известные подходы планирования и распределения ресурсов в промышленных сетях Интернета вещей. Показаны преимущества применения математического аппарат теории GERT-сетей в области телекоммуникаций и других областей. Отмечается, что область применения стохастических сетей и, в частности, GERT-сетей может быть расширена за счет исследований применения параметра ресурса с использованием функционально зависимых случайных величин. Рассматриваются зависимые и независимые случайные величины и характер их взаимосвязи в GERT-сети. Рассмотрены основные вопросы расчета количества ресурсов в промышленных сетях. Определены основные задачи научного исследования.

**Во второй главе** разработаны математические модели, методы и алгоритмы планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях.

Разработаны *математические модели* нахождения вероятности назначения пары операций, выполненных одной единицей ресурса. Рассмотрены два случая.

В *первом* случае операции относятся к различным процессам и возможность их выполнения одной единицей ресурса задается функцией, определяемой законами распределения вероятностей времени окончания одной и начала другой операций.

Предполагается, что система состоит из параллельных процессов  $a_i, i = \overline{1, m}$ . Пусть независимые случайные величины  $T_r$  и  $T_s$  выражают время окончания операции  $b_r$  и начала операции  $b_s$  соответственно ( $r$  и  $s$  – номера процессов,  $r \neq s$ ), а  $f_r(t_r)$  и  $f_s(t_s)$  есть плотности распределения вероятностей величин  $T_r$  и  $T_s$ . Случайная величина  $T_{rs}$  характеризует промежуток времени между двумя операциями. Плотность

распределения  $f_{rs}(t_{rs})$  разности  $T_{rs} = T_s - T_r$  равна  $f_{rs}(t_{rs}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_r(t_r) \cdot f_s(t_r - t_{rs}) dt_r$ .

Чтобы пара операций  $(b_r, b_s)$  выполнялась единицей ресурсов, время начала операции  $b_s$  должно быть позже времени окончания операции  $b_r$ . Другими словами, разность временного интервала между временем начала операции  $b_s$  и временем окончания операции  $b_r$  должна быть больше или равна нулю. Вероятность  $P_{rs_k}$  того, что любая пара операций  $(b_r, b_s)$ , принадлежащих разным процессам, может быть выполнена одной единицей ресурса, имеет вид 
$$P_{rs_k} = \int_0^{+\infty} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} f_r(t_r) \cdot f_s(t_r - t_{rs}) dt_r \right] dt_{rs}.$$

Разработана методика определения вероятности двух операций с помощью значения математического ожидания и дисперсии случайных величин по неравенству Чебышева в условии временной интервал между двумя операциями относительно большим.

Пусть  $(b_r, b_s)$  есть пара операций, в которой операции  $b_r$  и  $b_s$  принадлежат случайным реализациям графов  $a_r$  и  $a_s$  соответственно. Операции  $b_r$  и  $b_s$  имеют следующие характеристики: математические ожидания выполнения  $m_r$  и  $m_s$ , дисперсии  $\sigma_r^2$  и  $\sigma_s^2$  соответственно. Есть также,  $m_{2r}$  и  $\sigma_{2r}^2$  – математическое ожидание и дисперсия времени окончания операции  $b_r$ . А  $m_{1s}$  и  $\sigma_{1s}^2$  – математическое ожидание и дисперсия времени начала операции  $b_s$ . Если  $m_{2r} > m_{1s}$ ,  $1 \leq r \leq m$ ,  $1 \leq s \leq m$ ,  $r \neq s$ , то пара  $(b_r, b_s)$  не может быть выполнена одной единицей ресурса с заданной вероятностью.

Пусть  $t_{1r}$  и  $t_{2r}$  есть моменты начала и окончания операции  $b_r$ , а  $t_{1s}$  и  $t_{2s}$  – моменты начала и окончания операции  $b_s$  соответственно. Каждая из дисперсий  $\sigma_{2r}^2$  и  $\sigma_{1s}^2$  пары  $(b_r, b_s)$  будет определяться суммой дисперсий множества  $H = \{h_\delta\}$ ,  $\delta = \overline{1, \delta_m}$  работ, предшествующих операции  $b_r$ , и множества  $L = \{l_\varphi\}$ ,  $\varphi = \overline{1, \varphi_m}$  операций, предшествующих операции  $b_s$ . Множества H и L задаются случайными реализациями стохастических графов процессов. Математические ожидания и дисперсия имеют следующий вид  $m_{2r} = m_r + \sum_1^{\delta_m} m_{h_\delta}$ ,  $\sigma_{2r}^2 = \sigma_r^2 + \sum_1^{\delta_m} \sigma_{h_\delta}^2$  и  $m_{1s} = \sum_1^{\varphi_m} m_{l_\varphi}$ ,  $\sigma_{1s}^2 = \sum_1^{\varphi_m} \sigma_{l_\varphi}^2$ . Если выполняются следующие условия, пара  $(b_r, b_s)$  может быть выполнена единицей ресурса:  $m_{1s} \gg m_{2r}$ ,  $P_{rs_k} = P_r \cdot P_s \geq P_{rs_{k-3ал}}$ .  $P_{rs_{k-3ал}}$  является заданной вероятностью того, что две операции выполняются одной единицей ресурса, когда эти две операции принадлежат двум разным процессам.  $P_r$  и  $P_s$  – вероят-



ности того, что моменты  $t_{2r}$  и  $t_{1s}$  попадают в определенные интервалы. В соответствии с неравенством Чебышева они определяются следующими выражениями:

$$P_r \left\{ |t_{2r} - m_{2r}| \leq k_{2r} \sigma_{2r} \right\} \leq 1 - \frac{1}{k_{2r}^2}, k_{2r} > 0, \quad P_s \left\{ |t_{1s} - m_{2s}| \leq k_{1s} \sigma_{1s} \right\} \leq 1 - \frac{1}{k_{1s}^2}, k_{1s} > 0, \quad \text{где}$$

$k_{1s}, k_{2r}$  – произвольно положительные числа. Тогда минимальное значение  $k_{\min}$  положительных чисел  $k_{2r}$  и  $k_{1s}$  имеет следующий вид:

$$k_{\min} = k_{2r_{\min}} = k_{1s_{\min}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sqrt{P_{rs_{k-3ад}}}}}. \text{ Вероятность } P_{rs_{k-3ад}} \text{ достигается, когда расстояние}$$

между математическими ожиданиями двух случайных величин удовлетворяет следующему условию:  $m_{1s} - m_{2r} \geq k_{2r} \sigma_{2r} + k_{1s} \sigma_{1s}$ . Если успешно выбрать значения  $k_{2r}$  и  $k_{1s}$  таким образом, чтобы выполнялись условия  $m_{1s} \gg m_{2r}$  и  $P_{rs_{k-3ад}} \geq P_{rs_{k-3ад}}$ , то гарантируется выполнение операций одной единицей ресурса с вероятностью не ниже  $P_{rs_{k-3ад}}$ . Тогда вероятность  $P_{rs_{k-3ад}}$  достигается, когда:  $m_{1s} - m_{2r} \geq k_{\min} (\sigma_{2r} + \sigma_{1s})$  и

$$k_{\min} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sqrt{P_{rs_{k-3ад}}}}}, 0 \leq P_{rs_{k-3ад}} < 1. \text{ Вероятность } P_n \text{ того, что одной единицей ресурса}$$

может быть последовательно выполнено  $n$  операций, равна  $P_n = \prod_{\zeta=1}^{n-1} P_{rs_{k\zeta}}$ , а вероят-

ность  $P_{nN}$  того, что  $N$  единицами ресурса данного вида будет последовательно выполнено  $n$  операций, принадлежащих различным процессам, равна

$$P_{nN} = \prod_{\eta=1}^N \prod_{\zeta=1}^{n-1} P_{rs_{k\zeta\eta}}.$$

Во *втором* случае обе операции относятся к одному процессу и возможность их выполнения одной единицей ресурса определяется вероятностью последовательного выполнения двух операций. Пусть случайная реализация стохастического графа  $\mathcal{C}$  содержит последовательность операций  $Q = \{q_\theta\}$ ,  $\theta = \overline{1, \theta_m}$ , для выполнения которых необходим ресурс данного вида. Для каждой операции  $q_\theta \in Q$  задана вероятность ее выполнения  $P_\theta$ . Любая пара операций  $(q_r, q_s)$  из заданной последовательности может быть выполнена одной единицей ресурса, если вероятность последовательного выполнения двух операций  $P_{rs_\lambda} \geq P_{rs_{\lambda-3ад}}$ , где  $P_{rs_{\lambda-3ад}}$  – заданное значение вероятности для любой пары операций последовательности, принадлежащих одному процессу. Другими словами, вероятность того, что операция  $q_s$  будет выполнена, когда операция  $q_r$  уже выполнена ( $r, s \in \theta; r < s$ ). Вероятность  $P_{rs_\lambda}$  определяется произведением вероятностей выполнения всех операций от операции  $q_r$  до операции  $q_s$

при  $r < s$ :  $P_{rs\lambda} = \prod_{\theta=r}^s P_{\theta}$ . Когда две операции  $q_r$  и  $q_s$  находятся в нескольких реализациях, тогда вероятность  $P_{rs\lambda}$  пары операций равна сумме вероятностей всех  $m$  реализаций, содержащих две операции:  $P_{rs\lambda} = \sum_{i=1}^m P_{rs\lambda i}$ .

Рассмотрим множество операций, в котором  $\zeta_m$  пар операций не являются последовательными, возможность выполнения пары операций одной единицей ресурса определяется различными законами распределения вероятностей окончания первой и начала второй операций, и  $\theta_m$  последовательных пар операций, окончание одной и начало второй операции характеризуется одной случайной величиной, то вероятность выполнения множества операций одной единицей ресурса будет равна:

$$P_n = \prod_{\zeta=1}^{\zeta_m} P_{r,s\zeta} \prod_{\theta=1}^{\theta_m} P_{rs\lambda\theta},$$

а вероятность выполнения всех операций в заданное время  $N$  единицами ресурса данного вида будет равна  $P_{nN} = \prod_{\eta=1}^N \left( \prod_{\zeta=1}^{\zeta_m} P_{r,s\zeta\eta} \prod_{\theta=1}^{\theta_m} P_{rs\lambda\theta\eta} \right)$ .

Разработаны **численный метод и алгоритмы** для определения плотности распределения временного интервала между операциями на основе модели GERT-сети. По сравнению с известными методами предложенный метод позволяет рассматривать модели со сложной структурой. Метод основан на следующих принципах: источник, сток и начальный узел выбранной дуги рассматриваются как доминаторы иерархической GERT-сети. Далее повышаем уровень иерархии GERT-сети. Для этого все пути, исходящие из доминаторов или входящие в доминаторы, преобразуются в эквивалентные дуги. После этого необходимо удалить лишние узлы и дуги, не включенные в пути от источника до стока через начальный узел выбранной операции. Разработанные алгоритмы можно использовать как в случае, когда заданная операция находится в цикле, так и когда начальный узел заданной операции включает операцию в виде петли.

Предложены **основные этапы математического моделирования и алгоритм** для планирования и распределения разнородных ресурсов в модели GERT-сети с упорядоченными наборами дуг, позволяющие определить полное множество вариантов предоставления разных типов ресурсов для выполнения упорядоченных наборов операций. Таким образом, количество требуемых ресурсов промышленных сетей может уменьшить с рациональной вероятностью завершения.

Разработаны **математические модели, численно-аналитический метод и алгоритм** для планирования и распределения разнородных ресурсов с функционально зависимыми случайными операциями. Таким образом, пусть имеется непрерывная случайная величина времени выполнения  $T$  с плотностью  $f(t)$ ; случайная величина ресурса  $Y$  выражается через случайную величину  $T$  функциональной зависимостью  $Y = \phi(T)$ . Тогда плотность распределения вероятностей искомой случайной величи-

ны  $y$ :  $g(y) = dG(y)/dy = f[\varphi(y)]|\varphi'(y)|$ , где  $\varphi(y) = t$  есть функция обратная функции  $\phi(T) = Y$ . Рассмотрены два подхода применения функционально зависимых случайных величин ресурсов к модели GERT-сети: параллельный и последовательный, представленные на рисунке 1. В параллельном подходе добавлена случайная величина ресурса в зависимости от величины времени. Выполнено одновременно определение вероятностно-временных и вероятностно-ресурсных характеристик. При последовательном подходе значение специфических ресурсов выражено через основной ресурс. Необходимо определить распределение всех и отдельных типов ресурсов. Предложенные подходы позволяют расширить возможности классических GERT-сетей. Разработанный численно-аналитический метод и алгоритм возможно использовать в промышленных сетях при планировании и распределении разнородных ресурсов.



**Рисунок 1** – Последовательный и параллельный подходы применения функциональной зависимости к сетевой модели

Рассмотрены *параллельные и последовательные функциональные зависимости* случайных величин в параллельном подходе применения функциональных зависимостей. Позволяет создавать сложные задачи со многими функционально зависимыми случайными величинами одновременно и обеспечивает обзор системы, предоставляя взаимосвязи между величинами. На рисунке 2 представлены параллельные и последовательные функциональные зависимости, где величина  $T$  – время, остальные – разнородные ресурсы  $Y$ .



**Рисунок 2** – Параллельные и последовательные функциональные зависимости

Разработаны *математические модели* для определения вероятностно-ресурсных характеристик с учетом важности выделяемых ресурсов. Предложенные модели позволяют эффективно планировать и распределять ресурсы в процессе проектирования и эксплуатации промышленной системы.

*Экспоненциальное распределение ресурса.* Имеется непрерывная случайная величина времени  $T$  с плотностью  $\lambda e^{-\lambda t}$ , где  $\lambda$  – интенсивность обслуживания. Плотность вероятности и функция распределения случайной величины  $X$  имеют следующие виды:  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ ,  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ . Пусть  $a_1$  и  $a_2$  – фиксированные временные пороги. Рассмотрим следующие события: время меньше порогового времени  $a_1 (t < a_1)$ ; время больше порогового времени  $a_1 (t > a_1)$ ; - время больше порогового времени  $a_1$  и меньше порогового времени  $a_2$ , где  $a_1 < a_2 (a_1 < t < a_2)$ .

Определим линейное преобразование  $Y = kT, k > 0$ , где  $k$  – постоянный множитель. Обратная функция  $\varphi(y) = \frac{y}{k}$ ; а ее производная  $\varphi'(y) = \frac{1}{k}$ ; модуль производной  $\frac{1}{|k|}$ . Для экспоненциальных случайных величин получаем плотность ресурса:

$$g(y) = f\left(\frac{y}{k}\right) \cdot \frac{1}{|k|} = \frac{\lambda}{k} e^{-\frac{\lambda}{k}y}.$$

Плотность распределения ресурсов также является экспоненциальным распределением с интенсивностью  $\frac{\lambda}{k}$ . Тогда функция распределения

ресурсов формулируется следующим образом:  $G(y) = 1 - e^{-\frac{\lambda}{k}y}$ .

Имеем  $b_1 = ka_1$  и  $b_2 = ka_2$ , где  $b_1$  и  $b_2$  – фиксированные ресурсные пороги. Получаем плотность  $g(y)$  и функцию  $G(y)$  распределения, характеристическую  $\chi^{(cp)}(\zeta)$  и производящую  $M^{(cp)}(s)$  функцию ресурса с учетом ценности ресурсов, когда значение случайной величина ресурса  $Y$  попало в диапазон:

– для  $Y < b_1$ :

$$g_{y < b_1}(y) = \begin{cases} \frac{\lambda e^{-\lambda\left(\frac{y}{k}\right)}}{1 - e^{-\lambda a_1}} \cdot \frac{1}{k} = \frac{g(y)}{F(a_1)}, & y < b_1; \\ 0, & y \geq b_1 \end{cases}; \quad \chi_{y < b_1}^{(cp)}(\zeta) = \frac{\frac{\lambda}{k} \left[ 1 - e^{-b_1\left(\frac{\lambda}{k} - i\zeta\right)} \right]}{\left(\frac{\lambda}{k} - i\zeta\right) (1 - e^{-\lambda a_1})};$$

$$G_{y < b_1}(y) = \begin{cases} \frac{G(y)}{F(a_1)} = \frac{1 - e^{-\frac{\lambda}{k}y}}{1 - e^{-\lambda a_1}}, & y < b_1; \\ 1, & y \geq b_1 \end{cases}; \quad M_{y < b_1}^{(cp)}(s) = \frac{\frac{\lambda}{k} \left[ 1 - e^{-b_1\left(\frac{\lambda}{k} - s\right)} \right]}{\left(\frac{\lambda}{k} - s\right) (1 - e^{-\lambda a_1})}.$$

– для  $Y > b_1$  :

$$g_{y>b_1}(y) = \begin{cases} 0, & y \leq b_1 \\ \lambda e^{-\lambda\left(\frac{y}{k}\right)} \cdot \frac{1}{k} = \frac{g(y)}{1-F(a_1)}, & y > b_1 \end{cases}; \quad \chi_{y>b_1}^{(cp)}(\zeta) = \frac{\frac{\lambda}{k}}{\left(\frac{\lambda}{k} - i\zeta\right)} \cdot e^{-\left(\frac{\lambda}{k} - i\zeta\right)b_1 + \lambda a_1};$$

$$G_{y>b_1}(y) = \begin{cases} 0, & y \leq b_1 \\ \frac{G(y) - G(b_1)}{1-F(a_1)} = \frac{e^{-\frac{\lambda}{k}b_1} - e^{-\frac{\lambda}{k}y}}{e^{-\lambda a_1}}, & y > b_1 \end{cases}; \quad M_{y>b_1}^{(cp)}(s) = \frac{\frac{\lambda}{k}}{\left(\frac{\lambda}{k} - s\right)} \cdot e^{-\left(\frac{\lambda}{k} - s\right)b_1 + \lambda a_1}.$$

– для  $b_1 < Y < b_2$  :

$$g_{b_1 < y < b_2}(y) = \begin{cases} 0, y \leq b_1 \\ \frac{\lambda e^{-\lambda\left(\frac{y}{k}\right)} \cdot \frac{1}{k}}{e^{-\lambda a_1} - e^{-\lambda a_2}} = \frac{g(y)}{F(a_2) - F(a_1)}, b_1 < y < b_2; \\ 1, y \geq b_2 \end{cases}; \quad \chi_{b_1 < y < b_2}^{(cp)}(\zeta) = \frac{\frac{\lambda}{k}}{\left(\frac{\lambda}{k} - i\zeta\right)} \frac{\left[ e^{-b_1\left(\frac{\lambda}{k} - i\zeta\right)} - e^{-b_2\left(\frac{\lambda}{k} - i\zeta\right)} \right]}{\left( e^{-\lambda a_1} - e^{-\lambda a_2} \right)};$$

$$G_{b_1 < y < b_2}(y) = \begin{cases} 0, y \leq b_1 \\ \frac{G(y) - G(b_1)}{F(a_2) - F(a_1)} = \frac{e^{-\frac{\lambda}{k}b_1} - e^{-\frac{\lambda}{k}y}}{e^{-\lambda a_1} - e^{-\lambda a_2}}, b_1 < y < b_2; \\ 1, y \geq b_2 \end{cases}; \quad M_{b_1 < y < b_2}^{(cp)}(s) = \frac{\frac{\lambda}{k}}{\left(\frac{\lambda}{k} - s\right)} \frac{\left[ e^{-b_1\left(\frac{\lambda}{k} - s\right)} - e^{-b_2\left(\frac{\lambda}{k} - s\right)} \right]}{\left( e^{-\lambda a_1} - e^{-\lambda a_2} \right)}.$$

*Нормальное распределение ресурса.* При выполнении линейного функционального преобразования  $Y = kT$  функция распределения случайной величины ресурса  $Y$  равна  $G(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi k\sigma}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{(t-km)^2}{2k^2\sigma^2}} dy$ . Тогда условные плотности вероятностей попадания

случайной величины ресурса  $Y$  в интервалы вычисляются следующим образом:

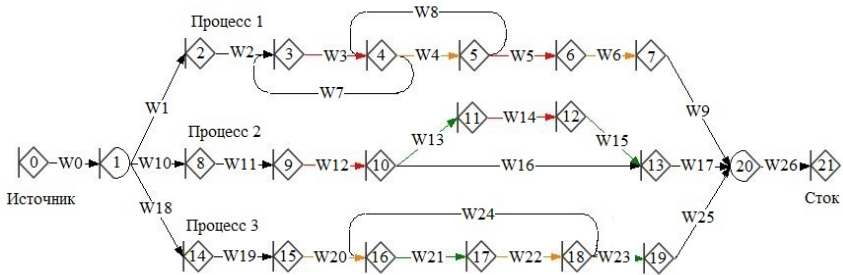
$$\text{для } Y < b_1: g_{y < b_1}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi k\sigma}} e^{-\frac{(y-km)^2}{2k^2\sigma^2}} \frac{1}{F(a_1)}; \quad \text{для } Y > b_1: g_{y > b_1}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi k\sigma}} e^{-\frac{(y-km)^2}{2k^2\sigma^2}} \frac{1}{1-F(a_1)}; \quad \text{для}$$

$$b_1 < Y < b_2: g_{b_1 < y < b_2}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi k\sigma}} e^{-\frac{(y-km)^2}{2k^2\sigma^2}} \frac{1}{F(a_2) - F(a_1)}; \quad \text{где } F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt - \text{функция}$$

распределения случайной величины времени.

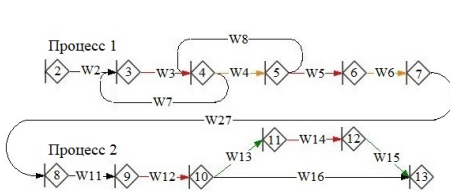
**В третьей главе** предложен набор методик планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных сетях на основе моделей GERT-сетей.

Разработана *методика* планирования и распределения разнородных ресурсов в устройствах обработки информации с упорядоченными наборами операций. Процесс обработки информации в устройстве состоит из трех подпроцессов. Система, отображающая процесс реализации по модели GERT-сети, изображена на рисунке 3. Операции, требующие ресурсов для выполнения, представлены дугами с разными цветами. Каждый цвет соответствует типу ресурса. Типы ресурсов, соответствующие каждому цвету: оперативная память – красный (W3, W5, W12, W14), кэш-память – зеленый (W13, W25, W21, W23), память на жестком диске – оранжевый (W4, W6, W20, W22). Единицы подобраны соответствующим образом типа ресурсов. Рассматриваемые устройства могут быть сетевыми устройствами или любыми другими устройствами в сети, которые содержат указанные выше ресурсы.

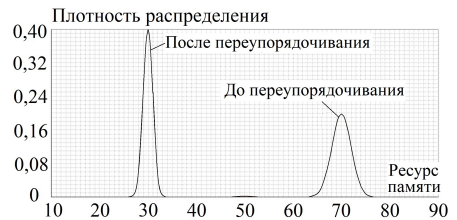


**Рисунок 3** – Модель GERT-сети обработки информации с тремя параллельными процессами

Перед изменением порядка распределения ресурсов необходимы две единицы ресурса для обработки четырех операций: первая единица: W3 → W5, вторая единица: W12 → W14. При  $P_{rs,ад} \geq 0,98$ , после переупорядочивания требуется только одна единица ресурса обработки для обслуживания четырех операций: W12 → W3 → W14 → W5 и  $P_{hN} = 0,984$ . Количество ресурсов уменьшено на 50 процентов с вероятностью завершения 98,4%. Модель объема необходимой памяти красного типа ресурса показана на рисунке 4. Операции в том же наборе заменены на операцию максимальной величины. Плотность распределения ресурсов памяти до и после изменения порядка предоставления ресурсов показана на рисунке 5.



**Рисунок 4** – Модель GERT-сети красного типа ресурса



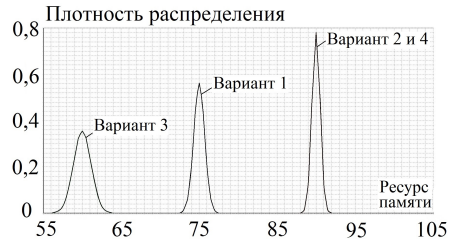
**Рисунок 5** – Плотность распределения красного типа ресурса до и после переупорядочивания

Второй тип ресурса – зеленый, делается аналогично. Следовательно, после перепорядочивания требуется одна единица ресурсов для обработки четырех операций:  $W13 \rightarrow W15 \rightarrow W21 \rightarrow W23$  и  $P_{nN} = 0,98$ . Количество ресурсов уменьшено на 50 процентов с вероятностью завершения 98%.

Особенно для оранжевого типа количество требуемых единиц ресурса обработки остается прежним, но изменяется порядок предоставления ресурса. Варианты предоставления оранжевого типа ресурса для выполнения операций показаны в таблице 1. Хотя варианты используют одинаковое количество единиц ресурсов обработки, объем разнородных ресурсов памяти в каждом варианте отличается. Обратите внимание, что единицей ресурса может быть базовая единица ресурса, такая как процессор, канал связи или байт данных. Единица ресурса также может быть набором базовых единиц ресурса. Объем ресурсов памяти в каждом варианте показан на рисунке 6.

**Таблица 1** Варианты предоставления оранжевого типа ресурса

Вариант	Единица ресурса	Порядок операций
1	Первая	W4 → W6
	Вторая	W20 → W22
2	Первая	W4 → W20
	Вторая	W6 → W22
3	Первая	W4 → W6 → W22
	Вторая	W20
4	Первая	W4 → W20 → W22
	Вторая	W6



**Рисунок 6** – Плотность распределения ресурсов памяти для вариантов

Вариант 3 использует наименьшее количество ресурсов со средним значением 60 единиц базовых ресурсов и вероятностью завершения  $P_{nN} = 0,972$ . Варианты 2 и 4 используют больше всего ресурсов со средним значением 90 и  $P_{nN} = 0,964$ ,  $P_{nN} = 0,9817$  соответственно. Вариант 1 имеет среднее значение 75 единиц базовых ресурсов и  $P_{nN} = 0,9824$ .

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о возможности оптимизации количества ресурсов, необходимых для выполнения операций с определенной вероятностью завершения, путем изменения порядка предоставления ресурсов для операций.

Разработана **методика** планирования разнородных ресурсов в экспоненциальной GERT-сети. Все дуги в сети описываются экспоненциальным распределением. Рассмотрены методы определения временных и ресурсных плотностей распределения при наличии функционально зависимых случайных величин используя аналитический метод теории вычетов. В режиме планирования необходимо построить новую модель GERT-сети ресурса с одинокой структурой модели GERT-сети времени. Ресурсная GERT-сеть изображена на рисунке 7.

Эквивалентная  $W$ -функция:

$$W_E(s) = \frac{W_0(s)W_1(s)W_2(s)W_4(s)}{1 - W_1(s)W_2(s)W_3(s)}$$

$$W_E(s) = \frac{0,0144}{(0,2 - s)^2(0,4 - s) - 0,0016}$$

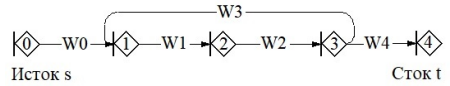


Рисунок 7 – Ресурсная GERT-сеть

Произведем замену  $-s = z$ . Получим функцию  $\Phi_E(z) = \frac{0,0144}{z^3 + 0,8z^2 + 0,2z + 0,0144}$ .

Окончательно получаем плотность распределения вероятностей  $g(y) = 0,3e^{-0,123y} - 0,3e^{-0,338y} \cos 0,044y - 1,46e^{-0,338y} \sin 0,044y$  и функция распределения вероятностей  $G(y) = 1 - 2,43e^{-0,123y} + 1,43e^{-0,338y} \cos 0,044y + 4,13e^{-0,338y} \sin 0,044y$ .

Снова рассмотрим модель на рисунке 7. Но сейчас, в отличие от ранее представленного рисунка рассмотрим две частных модели:

1) модель, в которой дуги  $W_1, W_2$  определяют ресурс первого типа. Остальные имеют производящую функцию моментов равную 1, что равносильно нулевому требующемуся ресурсу. Получаем плотность  $g_1(y) = 0,285(e^{-0,137y} - e^{-0,263y})$  и  $G_1(y) = 1 - 2,08e^{-0,137y} + 1,08e^{-0,263y}$ .

2) модель, в которой дуги  $W_0, W_3$  связаны с вторым типом ресурса, а ресурсы других типов для операций, отражаемых остальными дугами, не требуется. Получаем плотность  $g_2(y) = 0,36e^{-0,36y}$  и  $G_2(y) = 1 - 0,36e^{-0,36y}$ .

Графики функций  $g(y), g_1(y), g_2(y)$  и  $G(y), G_1(y), G_2(y)$  приведены на рисунках 8 и 9.

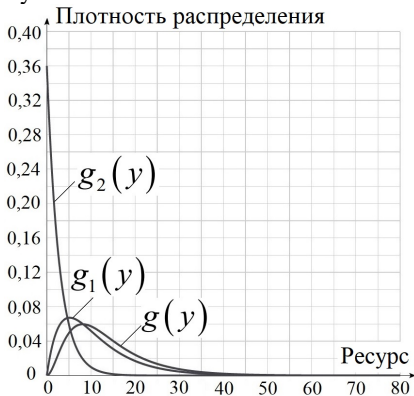


Рисунок 8 – Плотности распределения вероятности в экспоненциальной GERT-сети разного типа ресурсов

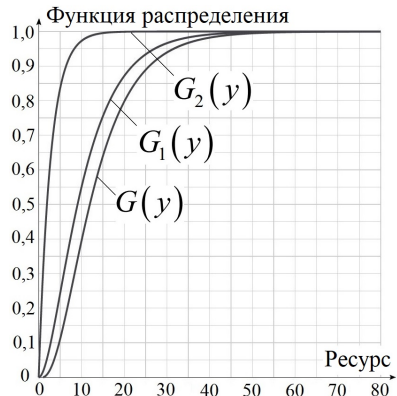
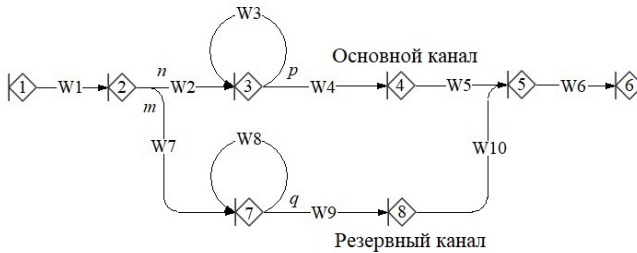


Рисунок 9 – Функции распределения в экспоненциальной GERT-сети разного типа ресурсов



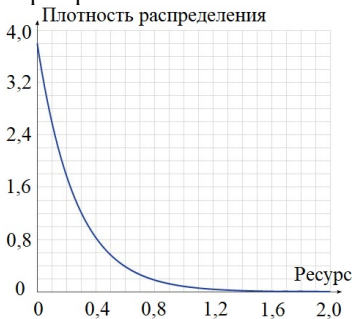
Методика включает алгоритм применения функционально зависимых случайных величин в экспоненциальных сетях ресурсов. Полученный в формульном виде результат позволяет выполнить дальнейшие математические операции, например, оптимизацию временных и ресурсных характеристик. Это способствует повышению точности и эффективности по сравнению с использованием численных методов. Методику можно рассматривать как решение задачи расчета вероятностно-ресурсных характеристик объема ресурсов сетей при различных функциональных зависимостях от исходных случайных величин.

Разработана **методика** нахождения ресурсов в модели резервного канала. Модель GERT-сети с резервным каналом изображена на рисунке 10.

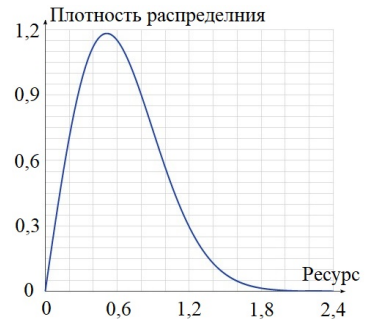


**Рисунок 10** – Модель GERT-сеть с резервным каналом

Данная модель предназначена для описания работы основного и резервного канала передачи данных. По основному каналу передается основной объем данных и без засекречивания данных. Резервный канал используется изредка, в основном для передачи зашифрованной информации. Работает либо основной канал, либо резервный канал. Используется один и тот же блок памяти. Объемы памяти для работы программ может быть различным или частично совпадать. Время пересылки связано с этими объемами функциональными зависимостями случайных величин. Основной канал занимает  $n$ -ю долю времени, а резервный –  $m$ -ю долю. Определен полный объем памяти для обеспечения функционирования любого из каналов в системе передачи данных. Рассмотрена поочередно работа каждого канала без учета вероятности его функционирования. Плотности распределения памяти, необходимой для основного и резервного каналов 11 и 12.



**Рисунок 11** – Плотность распределения ресурса основного канала



**Рисунок 12** – Плотность распределения ресурса резервного канала

Выберем подходящую единицу измерения памяти. Например, будем измерять память в мегабайтах. Для работы с основным каналом необходимо от 0 до 2 Мбайт. Для работы с резервным каналом нужно 2,4 Мбайт. Если программы не затираются, то крайние значения для этих каналов надо сложить, тогда необходимо 4,4 Мбайт. Если допустимо повторное использование памяти, то достаточно зарезервировать 2,4 Мбайт.

Разработана *методика* оценки доступности системы с нефиксированными порогами выделяемых ресурсов. Предложен метод использования GERT-сетей с положительными и отрицательными случайными величинами. Определен объем ресурсов, доступных для обслуживания системы обработки пакетов. Предположим, что на вход приемного устройства поступает некоторый пакет информации  $Y_1$  (например, в байтах). Он подвергается предварительной обработке, в результате чего его длина изменяется до величины  $Y_2$ . Зависимость между этими величинами монотонная. Ограничимся только линейными преобразованиями, то есть  $Y_2 = kY_1$ , где  $k$  – некоторая константа. Пакету длиной  $Y_2$  требуется некоторый объем памяти  $Y_3$ , не меньший по размеру. Если между случайными величинами справедливо  $Y_3 \geq Y_2$ , то это означает, что реализация случайной величины  $y_2$  меньше реализации случайной величины выделяемой памяти  $y_3$ . Тогда величина разности  $Y_{23} = Y_3 - Y_2$  положительная и пакет сразу может быть размещен в устройстве для обработки (например, в оперативной памяти). Если величина  $Y_{23}$  отрицательная, то пакет или обрабатывается по специальному алгоритму, приводящему к расширению памяти (например, сначала пишется на диск), или уничтожится. Таким образом, необходимо найти величину разности  $Y_{23}$  между двумя случайными величинами  $Y_2$  и  $Y_3$ .

Разработана *методика* использования ресурсов для изменения времени выполнения операций. Если необходимо выполнить операцию в более короткое время, то надо для этого привлечь дополнительный ресурс, задаваемый в виде функционального соотношения между случайными величинами. Необходимо рассчитать разность между случайными величинами времени выполнения операции и новым желаемым значением. Простая GERT-сеть передачи данных представлена на рисунке 13. GERT-сеть ресурса после добавления ресурсов для изменения времени выполнения операций представлена на рисунке 14. Дуга W5 отражает величину добавленных ресурсов, необходимых для сокращения времени передачи пакетов дуги W2.

Выходные величины временных и ресурсных GERT-сетей до и после сокращения времени передачи пакетов дуги W2 представлены на рисунках 15, 16. Использование ресурсов для изменения времени выполнения операций является приложением применения функциональных зависимостей для расширения возможностей теории GERT-сетей.

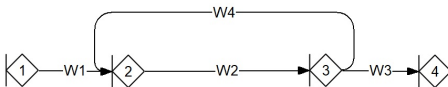


Рисунок 13 – Исходная GERT-сеть

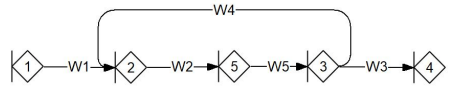
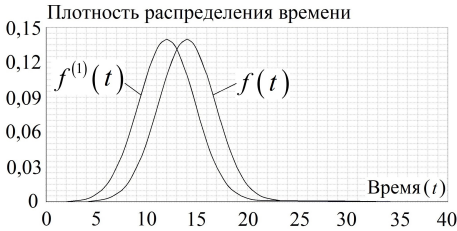
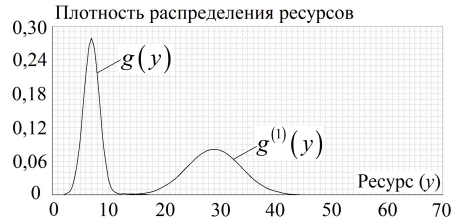


Рисунок 14 – Регулируемая GERT-сеть



**Рисунок 15** – Выходные плотности распределения временных GERT-сетей до  $f(t)$  и после  $f^{(1)}(t)$  сокращения времени передачи пакетов дуги W2



**Рисунок 16** – Выходные плотности распределения ресурсных GERT-сетей до  $g(y)$  и после  $g^{(1)}(y)$  сокращения времени передачи пакетов дуги W2

Разработана **методика** распределения ресурсов в раскрашенных GERT-сетях. Методика позволяет определить плотности вероятностей специфических ресурсов, представленных функциональными зависимостями и выделенных из основного ресурса. В модели дуги, которые связаны с ресурсами одного типа, будем помечены одним цветом. При вычислении дуги, которые используют специфический ресурс одного типа, сохраняют спецификации случайных единиц данного типа ресурса. Производящие функции остальных величин  $M(s) = 1$ , что означает, что для выполнения этих дуг не используется никакой ресурс.

**В четвертой главе** выполнено компьютерное моделирование процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях.

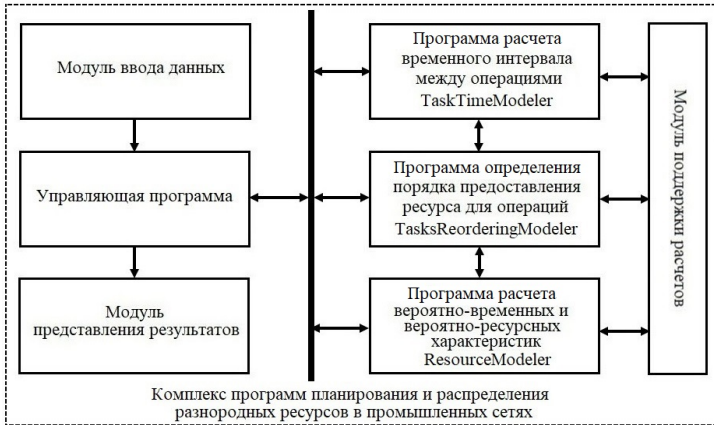
На основе предложенных в главах 2 и 3 математических моделей, методов, алгоритмов и практических методик разработан комплекс программ компьютерного моделирования процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях. Комплекс программ позволяет строить промышленные сети на основе модели GERT-сетей для анализа и оценки работы систем и проектов. Структура комплекса программ изображена на рисунке 17.

Комплекс программ планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях включает в себя три программы:

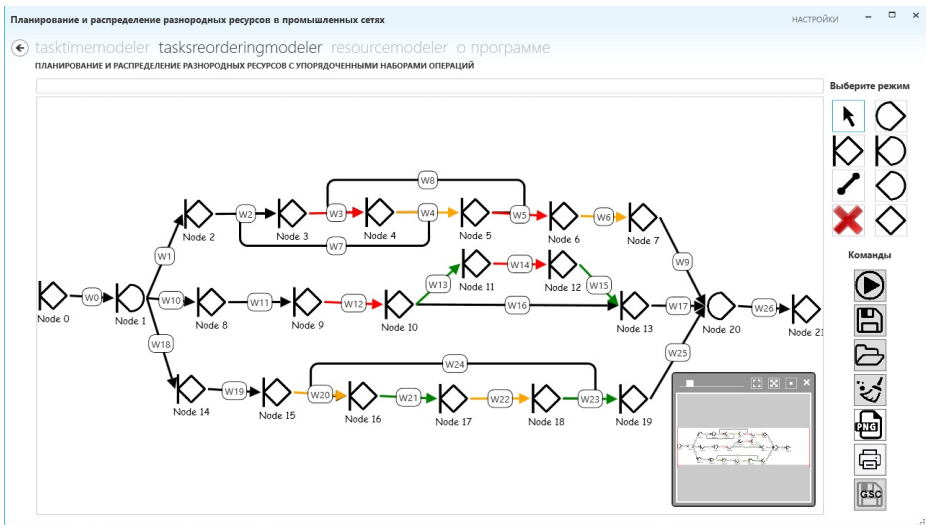
- TaskTimeModeler – программа расчета временного интервала между операциями;
- TasksReorderingModeler – программа планирования и распределения разнородных ресурсов с упорядоченным набором операций;
- ResourceModeler – программа планирования и распределения разнородных ресурсов с применением функциональных зависимостей.

Программы комплекса написаны на языке программирования C#. Графический редактор комплекса позволяет построить модель GERT-сети со всеми необходимыми параметрами и легко перетаскивать узлы. Дуги разного цвета представляют разные типы ресурсов. Параметры ресурсов выражаются через функциональную зависимость времени выполнения операций.

Модель GERT-сети в графическом редакторе изображена на рисунке 18.



**Рисунок 17** – Структура комплекса программ компьютерного моделирования процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях



**Рисунок 18** – Интерфейс комплекса программа компьютерного моделирования процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях

Полученные результаты комплекса программ согласуются с результатами рассмотренных примеров. Тем самым показана точность и эффективность комплекса программ. Все цели выполнены.

**В заключении** подведены основные результаты диссертационной работы, даются рекомендации и перспективы дальнейшего исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие новые результаты:

1 Разработаны математические модели, численный метод и алгоритмы назначения пары операций в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей, отличающиеся наличием обобщенного подхода для достижения любого узла в модели GERT-сети, а также возможностью определения вероятности двух операций, последовательно выполненных одной единицей ресурса. Применение предложенного подхода позволяет сократить на 15-20% среднее время вычисления временного интервала между операциями в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей.

2 Разработаны математические модели и алгоритм планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях с упорядоченными наборами операций, которые позволяют определить совокупность вариантов предоставления ресурсов для операций, принадлежащих одному упорядоченному набору с определенной вероятностью завершения. Применение предложенных математических моделей и алгоритма позволило снизить до 50% количество необходимых ресурсов и сократить на 15-20% среднее значение объема заданного ресурса.

3 Разработаны математические модели определения вероятностно-ресурсных характеристик с учетом важности выделяемых ресурсов в промышленных сетях, которые позволяют использовать функциональные зависимости между случайными величинами времени и ресурсов и одновременно вычислять их плотности распределения в условиях ограничений по величине времени.

4 Разработаны методики планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных сетях, которые позволяют повысить на 15% эффективность информационных и технологических процессов.

5 Разработан комплекс программ компьютерного моделирования процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей. Использование разработанного комплекса программ позволяет сократить время проектирования и анализа промышленных сетей.

Полученные результаты могут найти применение в области управления ресурсами в процессе проектирования и анализа промышленных сетей. Направления дальнейших исследований могут заключаться в разработке и развитии подходов оптимизации временных и ресурсных характеристик промышленных сетей с применением функциональных зависимостей.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Фам А. М. Использование стохастических сетей при планировании прибыли с учетом возможных потерь / А. П. Шибанов, А. З. Нгуен, А. М. Фам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2020. № 71. – С. 60-70.

2. Фам А. М. Задача планирования объема разнородных ресурсов в промышленных GERT-сетях с функционально зависимыми случайными операциями / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам, А. З. Нгуен // Системы управления и информационные технологии. – 2020. № 4(82). – С. 35-39.

3. Фам А. М. Математические модели процесса передачи данных в телекоммуникационных сетях с контрольными операциями / Д. А. Перепелкин, А. З. Нгуен, А. М. Фам // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. Т.8 № 4(31). – С. 1-10.

4. Фам А. М. Математическая модель расчета вероятностно-ресурсных характеристик телекоммуникационных сетей с учетом важности выделяемых ресурсов / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам // Системы управления и информационные технологии. – 2021. № 2(84). – С. 9-14.

5. Фам А. М. Математическое и компьютерное моделирование процессов планирования и распределения разнородных ресурсов в телекоммуникационных сетях / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. № 77. – С. 68-78.

6. Фам А. М. Математические модели планирования упорядоченного набора операций для распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных сетях / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. № 79. – С. 56-67.

**Статьи в изданиях, входящих в международные базы Web of Science и Scopus:**

7. Pham A. M. Computer Modeling System of Allocating and Planning Processes of Heterogeneous Resources in Industrial Telecommunication Networks / D. A. Perepelkin, A. M. Pham // XVII International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY), Moscow, Russia, 2021, pp. 22-27.

8. Pham A. M. Planning and Distribution Algorithm of Heterogeneous Resources in Industrial Telecommunication Networks with Ordered Sets of Tasks / D. A. Perepelkin, A. M. Pham // 14th International Conference ELEKTRO, Krakow, Poland, 2022.

**Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

9. Фам А. М. Программа планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных сетях / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам // Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021680847. Зарегистрировано в РОСПАТЕНТ 15.12.2021, заявка № 2021680011.

**Статьи в научно-технических журналах и тезисы докладов конференций:**

10. Фам А. М. Аналитические модели телекоммуникационных каналов с контрольными операциями / А. П. Шибанов, А. З. Нгуен, А. М. Фам // Радиотехника. – 2019. Т.83. № 11(18). – С. 35-40.

11. Фам А. М. Применение GERT-сетей для оценки функциональных зависимостей по ресурсам / А. М. Фам, А. П. Шибанов // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIV юбилейной Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2019. – С. 72-73.

12. Фам А. М. Расчет объема ресурсов в GERT-сетях / А. М. Фам, А. Н. Сапрыкин // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXV юбилейной Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2020. – С. 103-104.

13. Фам А. М. Распределение ресурсов в раскрашенных GERT-сетях / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы V Всероссийской научно-технической конференции / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2020. – С. 182-188.

14. Фам А. М. Методика расчета временных и ресурсных характеристик промышленных сетей с функционально зависимыми случайными операциями / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам // Современные технологии в науке и образовании: материалы IV Международный научно-технический форум / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2021. Сборник трудов, Том 3 – С. 118-121.

15. Фам А. М. Разработка программной системы для планирования и распределения разнородных ресурсов в промышленных телекоммуникационных сетях / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXVI Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2021. – С. 118-119.

16. Фам А. М. Задача расширения функциональных возможностей теории GERT-сетей при планировании и распределении разнородных ресурсов / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы VI Всероссийской научно-технической конференции / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2021. – С. 259-265.

17. Фам А. М. Методика планирования и распределения ресурсов для корректировки времени выполнения операций в промышленных сетях / Д. А. Перепелкин, А. М. Фам // Современные технологии в науке и образовании: материалы V Международный научно-технический форум / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2022.

**ФАМ Ань Минь**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ  
РЕСУРСОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_, 22. Формат бумаги 60×84 1/16

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0

Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_.

Рязанский радиотехнический государственный радиоуниверситет им. В.Ф. Уткина

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.