

На правах рукописи



НГУЕН Ань Зунг

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЕЙ
С ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАВИСИМЫМИ КОНТРОЛЬНЫМИ
ОПЕРАЦИЯМИ**

Специальность 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования
(технические системы)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2021

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: **Кулагин Владимир Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой КБ-5 «Аппаратное, программное и математическое обеспечение вычислительных систем» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), г. Москва

Мосин Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора ООО «ЛабСистемс», г. Владимир

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Защита диссертации состоится «01» июля 2021 г. в 14.00 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.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Д.А. Перепелкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время для оптимизации и моделирования технических систем все большее распространение получают альтернативные стохастические сети, в частности модели GERT-сетей (GERT – Graphical Evaluation And Review Technique). Модели GERT-сетей применяется для оптимизации производственных и технологических процессов, моделирования распределенных систем обработки информации, исследования вероятностно-временных характеристик сетевого планирования передачи данных в телекоммуникационных сетях. GERT-сети позволяют определить не только значения переменных, связанных с моментами распределения выходной величины сети (математическое ожидание, дисперсия), но и получить функцию распределения, с использованием которой дальше провести дальнейшие математические преобразования.

В промышленных сетях выполняется обмен данными между устройствами, входящими в состав автоматизированной системы (компьютерами, контроллерами, датчиками и т.п.). GERT-сети часто используются на практике для описания процессов моделирования и исследования эффективности передачи данных между устройствами в промышленных сетях.

Процесс выполнения одной за другой пары операций в промышленной сети на основе моделей GERT-сетей может быть рассмотрен в функциональной зависимости второй операции от первой при условии строгой монотонности такой зависимости. При этом действие одной случайной величины сказывается определенным образом на исход другой случайной величины. Например, при планировании процесса передачи данных в промышленных сетях после выполнения операции передачи файла необходимо выполнить контрольные операции, которые позволяют проверить корректность, обнаружить ошибки передаваемых данных и повысить надежность процесса передачи данных. Под контрольной операцией понимается процедура проверки выполнения операций предшествования, которая позволяет получить разрешение на продолжение дальнейших информационных и технологических процессов. Время операции передачи данных в промышленных сетях определяется длиной файла, а время контрольной операции составляет долю от длины файла. При этом в модели суммируются длительности обеих операций.

Проведенный анализ и исследование предметной области показал, что модели планирования и выполнения проектов в промышленных сетях (в том числе и GERT-модели) с функциональными зависимостями между операциями не освещены в научной литературе. Резюмируя все сказанное, можно считать тему данной диссертации актуальной. Актуальность темы диссертации также подтверждается тем, что она выполнялась при финансовой поддержке в рамках госзадания № 9-14Г (госрегистрация НИР № 115011560084).

Степень разработанности темы исследования. Основоположниками теории функционально зависимых случайных величин являются Ван дер Варден Б.А., Doukhan P., Louhichi S., Dedecker J., Lang G., Leon J., Shao, X., Withers, C.S., Tran, L.T., Birkel T., Wu W.B., Rosenblatt M.F., X.; Grama, I., Liu, Q., Bernstein, S., Вентцель Е.С., Овчаров Л.А., Гнеденко БВ, Коваленко И.Н., Филиппова А.А., Мешалкин Л.Д., Пугачев В.С., Свешников А.А., Смирнов Н.В., Дудин-Бурковский И.В.

Основы GERT-сетей заложили А.А., Pritsker, W.W. Happ, G.E. Whitehouse, K. Neumann, U. Steinhardt, А.П. Шибанов, Д. Филлипс, А. Гарсиа Диас. Решению прикладных проблем с помощью GERT-сетей посвящены работы как отечественных авторов: Г.П. Захарова, Д.А. Абдуллаева, У.Б. Амирсаидова, Е.А. Антамошкиной, В.П. Корячко, Н.А. Максимова, О.К. Осипчука, М.Г. Доррера, А.С. Дегтерева, Д.М. Письмана, А.А. Зырянова, В.А. Лебедева, Н.Н. Трохова, Р.Ю. Царева, Л.В. Ермолаевой, К.В. Вид, Е.Ф. Аврамчука, А.А. Вавилова, С.В. Емельянова так и зарубежных: W.J. Thompson, Yu, Jung-Lok, Azougagh, Driss, Kim, Jin-Soo, S. Razeghi, S. Iranzadeh, K.R. Youshanloi, M. Bagherpour, H. Bevrani, J. Wang, M. Chen, A. Wyrozebski, M. Agarwal, M.P. Pooja, H. Feili, S.H. Alavi, M. Najmoddin, R. Antkiewicz, M. Dyk, R. Kasprzyk, A. Najgebauer, D. Pierzchalam, Z. Tarapata, K.P. Jose, S.S. Hashemin, T.F. Fatemi Ghomi.

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение эффективности информационных и технологических процессов, а также расширение функциональных возможностей моделей GERT-сетей посредством разработки математического обеспечения автоматизированного проектирования промышленных сетей с функционально зависимыми контрольными операциями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- провести исследование и анализ функциональных зависимостей контрольных операций в промышленных сетях на основе математического аппарата GERT-сетей;
- разработать методику расчета распределения Кокса на основе моделей GERT-сетей;
- разработать методику планирования сборочных операций стохастической структуры для решения задач с функциями от случайных величин на основе моделей GERT-сетей;
- разработать модель использования аналитических функций в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей для получения плотности и функции распределения вероятностей функционально зависимых контрольных операций;
- разработать методику планирования прибыли с учетом возможных потерь за счет введения в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей отрицательных и положительных случайных величин.

Объект исследования: процессы проектирования и планирования сборочных операций промышленных сетей.

Предмет исследования: средства математического обеспечения автоматизированного проектирования промышленных сетей с функционально зависимыми контрольными операциями.

Методология и методы исследования. Методология связана с анализом логической структуры методов исследования, 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, теории массового обслуживания.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования» согласно пунктам: п.1, п.2, п.3 и п.6.

Научная новизна. В диссертации содержится решение актуальной научной задачи разработки математического обеспечения автоматизированного проектирования промышленных сетей с функционально зависимыми контрольными операциями, имеющего существенное значение для повышения эффективности информационных и технологических процессов, а также расширения функциональных возможностей моделей GERT-сетей.

В работе получены следующие результаты, отличающиеся научной новизной:

– методика расчета распределения Кокса на основе моделей GERT-сетей, позволяющая повысить эффективность информационных процессов промышленных сетей;

– методика планирования сборочных операций с функциями контроля в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей, позволяющая повысить надежность выполнения данных операций;

– модель использования теории вычетов для получения законов распределения вероятностей функционально зависимых контрольных операций в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей, которые позволяют провести математические преобразования, выполняемые при анализе процессов передачи информации с учетом отношений предшествования;

– методика планирования прибыли с учетом возможных потерь за счет введения в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей отрицательных и положительных случайных величин.

Положения, выносимые на защиту:

1 Методика расчета распределения Кокса на основе моделей GERT-сетей.

2 Методика планирования сборочных операций промышленных сетей с функциями контроля на основе моделей GERT-сетей.

3 Модель использования аналитических функций с функциями контрольных операций для получения законов распределения вероятностей функционально зависимых контрольных операций промышленных сетей на основе моделей GERT-сетей.

4 Методика планирования прибыли с учетом возможных потерь за счет введения в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей отрицательных и положительных случайных величин.

Степень достоверности. 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 разработанного математического обеспечения автоматизированного проектирования промышлен-

ных сетей с функциональными преобразованиями контрольных операций созданы инженерные методики. Теоретическая значимость работы заключается:

- в реализации методик получения распределения Кокса на основе моделей GERT-сетей.

- в создании методики использованием сетей стохастической структуры для решения задач с функциями от случайных величин при планирования сборочных операций на основе моделей GERT-сетей;

- использования теории вычетов и функционально зависимых контрольных операций для получения функций распределения промышленных сетей на основе моделей GERT-сетей;

- в разработке нового класса моделей промышленных сетей на основе моделей GERT-сетей с использованием положительных и отрицательных случайных величин.

Диссертация имеет практическую значимость при проектировании технических систем со сложной структурой и может быть использована в учебном процессе. Практическая значимость работы подтверждается актами о внедрении в организациях ООО «Beetech Technology And Service Multimedia» (Вьетнам) и ООО «Technology Win Win Media» (Вьетнам), а также в учебный процесс РГРТУ на кафедре САПР ВС.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований докладывались и обсуждались на II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2017); III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2018); XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2019); XXV юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2020).

Публикации. По итогам проведенных исследований опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня ВАК, 5 тезисов докладов на всероссийских конференциях, 4 статьи в межвузовских сборниках научных трудов.

Результаты работы внедрены:

- в ООО «Beetech Technology And Service Multimedia» (Вьетнам);

- в ООО «Technology Win Win Media» (Вьетнам);

- в учебном процессе ФГБОУ ВО «РГРТУ» на кафедре САПР ВС.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, 1 приложения, изложенных на 160 страницах (включая 70 рисунков и 12 таблиц). Список литературы содержит 122 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и определены основные задачи исследования, отмечена научная новизна работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается использование распределения Кокса в GERT-сетях и определение плотности распределения вероятностей в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей при функциональной зависимости контрольных опе-

раций. Распределение Кокса с $n > 0$ фазами, интерпретируется временем достижения нуля марковского процесса, выходящего из состояния n . Процесс находится в состоянии $1 \leq k \leq n$ экспоненциальное время с параметром μ_k . Далее возможны два варианта: 1) если процесс оказывается в состоянии k , а потом переходит в состояние 0 с вероятностью α_k ; 2) процесс переходит в состояние $k-1$ с вероятностью $\bar{\alpha}_k = 1 - \alpha_k$ ($\alpha_k < 1$). Данное распределение приведено на рисунке 1.

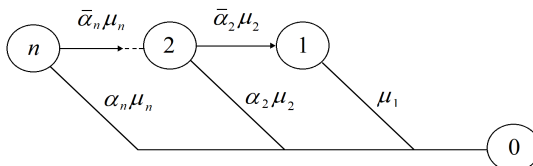


Рисунок 1 – Распределение Кокса с n фазами

Распределение Кокса с n фазами используется для аппроксимации положительных распределений через использование экспоненциальных выражений. Полагается, что Y_k – время попадания в состояние 0 при старте из состояния k , $F_k = 1 - \bar{F}_k$ функция распределения случайной величины Y_k . На основе распределения Кокса рассматриваются теоремы, определяющие постоянные коэффициенты в выражениях.

Комбинируя крутое, плоское и обобщенные распределения получают аппроксимации любых положительных плотностей распределения случайных величин. Однако применение распределения Кокса для функций от случайных величин в известных работах не рассматривается. В связи с этим в первой главе диссертации приводится обзор стохастических сетей и промышленных сетей на основе моделей GERT-сетей и полученные на их основе результаты. Подробно описываются функционально зависимые контрольные операции.

Также в первой главе выполнен анализ применения промышленных сетей на основе моделей GERT-сетей в различных областях.

Рассматривается задача определения плотности распределения вероятностей в промышленной сети на основе моделей GERT-сетей при функциональной зависимости контрольных операций. Часто на практике встречаются задачи, когда реализация исхода случайной величины вызывает действие другой операции. Пусть, например, одна случайная величина определяет продолжительность некоторой операции. Этой длительности может соответствовать некоторая функция времени контроля качества выполнения этой операции. Приводится методика определения функционально зависимой контрольной операции при условии строгой монотонности этих величин.

Таким образом, проведено исследование и анализ функциональных зависимостей контрольных операций в промышленных сетях на основе математического аппарата GERT-сетей.

Во второй главе рассматривается создание математического обеспечения автоматизированного проектирования промышленных сетей на основе моделей GERT-сетей с функционально зависимыми случайными величинами для схем с ветвлениями и задержкой (рисунок 2).

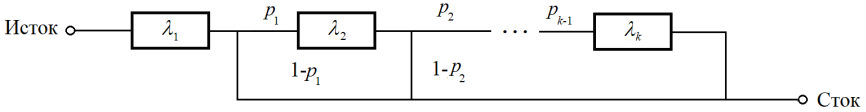


Рисунок 2 – Схема с ветвлениями и задержкой

Эквивалентная схема с ветвлениями и задержкой приведена на рисунки 3. Задержка на выходе схемы с ветвлениями является случайной переменной с *распределением Кокса k-порядка*, если задержка в каждом блоке или состоянии распределена по экспоненциальному закону. Распределение Кокса известно также как *распределение Эрланда с ветвлениями*.

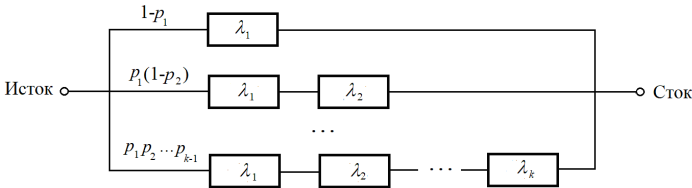


Рисунок 3 – Эквивалентная схема с ветвлениями и задержкой

Эквивалентная W -функция $W_E(s)$ промышленной сети на основе моделей GERT-сетей для данной схемы равна:

$$W_E(s) = (1-p_1) \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - s} + p_1 (1-p_2) \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - s} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - s} + \dots + p_1 p_2 \dots p_{k-1} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - s} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - s} \dots \frac{\lambda_k}{\lambda_k - s}.$$

Решение уравнения зависит от того, полюса какого порядка имеются в этом выражении. Возможны три варианта сочетаний:

- 1) у всех слагаемых имеются только простые полюса;
- 2) в выражении имеется простой полюс (у первого слагаемого это будет обязательно) и кроме того, другие слагаемые имеют полюсы порядка второго или выше;
- 3) в выражении имеется простой полюс (у первого слагаемого это будет обязательно), остальные слагаемые содержат как полюсы первого порядка, так и полюсы второго порядка и выше. Наличие полюсов определенных порядков зависит от совпадения коэффициентов интенсивности экспоненциального распределения.

Следует отметить, что выбор трех слагаемых принципиально не изменяет сути метода. В упрощенном варианте выражение для $\Phi_E(z)$ имеет вид:

$$\Phi_E(z) = \frac{(1-p_1)\lambda_1}{\lambda_1 + z} + \frac{p_1(1-p_2)\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 + z)(\lambda_2 + z)} + \frac{p_1p_2\lambda_1\lambda_2\lambda_3}{(\lambda_1 + z)(\lambda_2 + z)(\lambda_3 + z)}.$$

Нахождение эквивалентной плотности распределения вероятностей вычислялось отдельно по каждому слагаемому с учетом вероятности выполнения. Рассматривалось первое слагаемое: $\Phi_E(z) = (1-p_1)\lambda_1 / (\lambda_1 + z)$. Это обычная экспонента, умноженная на вероятность выполнения. Она имела полюс первого порядка в точке

$z = -\lambda_1$. Плотность ее вероятности $(1-p_1)\lambda_1 e^{-\lambda_1 t}$. Так как $\lambda_1 = 1$, то $(1-p_1)\lambda e^{-t}$.

Нахождение плотности распределения вероятностей второго слагаемого зависело от равенства или неравенства полюсов выражения друг другу. Эквивалентная W -функция второго слагаемого определялась по выражению $W_E(s) = p_1(1-p_2)\lambda_1\lambda_2/[(\lambda_1-s)(\lambda_2-s)]$. После выполнения преобразования $s = -z$ получали $\Phi_E(z) = p_1(1-p_2)\lambda_1\lambda_2/[\lambda_1\lambda_2 + z(\lambda_1 + \lambda_2) + z^2]$.

Сначала был рассмотрен случай, когда полюсы первого порядка не равны друг другу, т. е. $\lambda_1 \neq \lambda_2$. Пусть $z = -\lambda_1 = -1$, а $z = -\lambda_2 = -2$. Для этой функции выполнялись условия леммы Жордана. Далее выполнялось интегрирование по контуру Бромвича: $e^{zt}\Phi_E(s) = e^{zt}p_1(1-p_2)\lambda_1\lambda_2/[\lambda_1\lambda_2 + z(\lambda_1 + \lambda_2) + z^2]$. Интегрирование позволило получить функцию $\varphi(t) = e^{zt}p_1(1-p_2)\lambda_1\lambda_2/[2z + \lambda_1 + \lambda_2] = \eta(z)/\omega'(z)$. После подставления в предыдущую формулу значения полюсов, объединялись две возможности прохождения второго s - t -пути: $\varphi(t) = (1-p_1)\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + p_1(1-p_2)(2e^{-t} - 2e^{-2t})$.

Далее был рассмотрен случай, когда два полюса второй операции равны. Пусть $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$. Тогда эквивалентная W -функция второго слагаемого второго s - t -пути равна $W_E(s) = p_1(1-p_2)\lambda_1^2/(\lambda_1^2 - s)$. Время выполнения операции определялось как распределение Эрланга второго порядка. Была получена плотность распределения вероятности $p_1(1-p_2)\lambda_1^2 t e^{-\lambda_1 t}$. Плотность второго s - t -пути $\varphi(t) = (1-p_1)\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + p_1(1-p_2)\lambda_1^2 t e^{-\lambda_1 t}$. Эквивалентная W -функция третьего s - t -пути равна: $W_E(z) = p_1 p_2 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 / [(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)(\lambda_3 - s)]$.

Также рассматривался случай, когда все полюсы взаимно не равны друг другу $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$. В этом случае рассматривались простые полюсы, например, полюсы в точках $z_1 = -\lambda_1 = -1$, $z_2 = -\lambda_2 = -2$, $z_3 = -\lambda_3 = -3$. Меняя переменные, получили:

$$\Phi_E(z) = p_1 p_2 \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 + z(\lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2) + z^2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) + z^3)}. \quad \text{Далее}$$

подставляли значения интенсивностей в выражение: $e^{zt}\varphi(t) = e^{zt}\eta(z)/\omega'(z)$ и значения полюсов: $\varphi(t) = p_1 p_2 (3e^{-t} - 6e^{-2t} + 3e^{-3t})$.

Также рассмотрен случай, когда в третьем s - t -пути имелись операции, характеризуемые простым полюсом (имелась только одна операция, у которой при вычислении плотности находится полюс 1-го порядка), а также операция, при нахождении плотности которой вычисляется полюс n -го порядка. Для определенности использовался второй и третий порядок вычета. С учетом этого, плотность распределения второй операции равнялась $\lambda^2 t e^{-\lambda t}$, а третьей — $\lambda^3 t^2 e^{-\lambda t}/2$. Это плотности распределения Эрланга 2-го и 3-го порядков. Были учтены вероятности выполнения данных операций. Так как $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = \lambda_3 = 2$. В итоге получили выражение:

$$\varphi(t) = (1-p_1)e^{-t} + p_1(1-p_2)\lambda^2 t e^{-\lambda t} + p_1 p_2 \lambda^3 t^2 e^{-\lambda t}/2.$$

Далее подставили в $\varphi(t)$ значение обратной функции ϕ и умножили ее на модуль производной.

Получили плотности прохождения s - t -путей:

$$- \varphi(t) = (1 - p_1) e^{-t} \text{ — для 1-го пути (простой полюс);}$$

$$- \varphi(t) = (1 - p_1) e^{-t} + p_1(1 - p_2)(2e^{-t} - 2e^{-2t}) \text{ — для 2-го пути (простой полюс);}$$

$$- \varphi(t) = (1 - p_1) e^{-t} + p_1(1 - p_2) t e^{-\lambda t} \text{ — для 2-го пути (полюс 2-го порядка);}$$

$$- \varphi(t) = p_1 p_2 (3e^{-t} - 6e^{-2t} + 3e^{-3t}) \text{ — для 3-го пути (простой полюс);}$$

$$- \varphi(t) = (1 - p_1) e^{-t} + p_1(1 - p_2) \lambda^2 t e^{-\lambda t} + p_1 p_2 \lambda^3 t^2 e^{-\lambda t} / 2 \text{ — для 3-го пути (простой полюс и два полюса } n\text{-го порядков).}$$

Линейное преобразование $Y = kX$. Все показатели степени в экспонентах делятся на значение k .

— для 1-го s - t -пути:

$$g(y) = (1 - p_1)(1/k) \exp(-y/k);$$

— для 2-го s - t -пути (простой полюс):

$$g(y) = (1 - p_1)(1/k) \exp(-y/k) + p_1(1 - p_2)((2/k) \exp(-y/k) - (2/k) \exp(-2y/k));$$

— для 2-го s - t -пути (полюс 2-го порядка):

$$g(y) = (1 - p_1)(1/k) \exp(-y/k) + p_1(1 - p_2)(1/k) t \exp(-\lambda y/k);$$

— для 3-го s - t -пути (простой полюс):

$$g(y) = p_1 p_2 ((3/k) \exp(-y/k) - (6/k) \exp(-2y/k) + (3/k) \exp(-3y/k));$$

— для 3-го пути (простой полюс и два полюса n -го порядков):

$$g(y) = (1 - p_1)(1/k) \exp(-y/k) + p_1(1 - p_2) \lambda^2 y(1/k) \exp(-\lambda y/k) + p_1 p_2 (1/2k) \lambda^3 y^2 \exp(-\lambda y/k).$$

Преобразование вида $Y = X^2, X > 0$.

— для 1-го s - t -пути:

$$g(y) = (1 - p_1) e^{-\sqrt{y}} / (2\sqrt{y});$$

— для 2-го s - t -пути (простой полюс):

$$g(y) = (1 - p_1) e^{-\sqrt{y}} / (2\sqrt{y}) + p_1(1 - p_2)(2e^{-\sqrt{y}} - 2e^{-2\sqrt{y}}) / (2\sqrt{y});$$

— для 2-го s - t -пути (полюс 2-го порядка):

$$g(y) = (1 - p_1) e^{-\sqrt{y}} / (2\sqrt{y}) + p_1(1 - p_2) t e^{-\lambda \sqrt{y}} / (2\sqrt{y});$$

— для 3-го s - t -пути (простой полюс):

$$g(y) = p_1 p_2 (3e^{-\sqrt{y}} - 6e^{-2\sqrt{y}} + 3e^{-3\sqrt{y}}) / (2\sqrt{y});$$

— для 3-го пути (простой полюс и два полюса n -го порядков):

$$g(y) = (1 - p_1) e^{-\sqrt{y}} / (2\sqrt{y}) + p_1(1 - p_2) \lambda^2 t e^{-\lambda \sqrt{y}} / (2\sqrt{y}) + p_1 p_2 \lambda^3 y e^{-\lambda \sqrt{y}} / (4\sqrt{y}).$$

Таким образом, в главе предложена методика расчета распределения Кокса на основе моделей GERT-сетей, позволяющая повысить эффективность информационных процессов промышленных сетей.

В третьей главе предложен набор методик применения функционально зависимых контрольных операций в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей.

Разработана методика применения стохастических сетей при планировании сборочных операций с функциями контроля качества выполняемых операций. Методика основана на определении времени контрольных операций и нахождения распределения времени сборки как максимальной из нескольких случайных величин с использованием численного метода.

В общем случае проект заключался в выполнении сборки устройства, состоящего из трех путей (рисунок 4). Операции подготовки к сборке описывались нормальными законами распределения с параметрами $m_1 = 9, \sigma_1^2 = 1$ (путь 1), $m_2 = 10, \sigma_2^2 = 4$ (путь 2), $m_3 = 11, \sigma_3^2 = 9$ (путь 3). Время контроля операций (время проверки качества выполняемых операций) выбиралось в функциональном отношении от времени выполнения операций: $Y = 3X$.

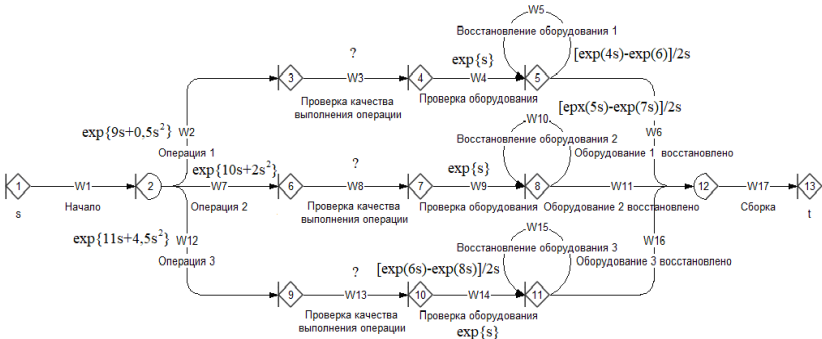


Рисунок 4 – Стохастическая модель процесса сборки

Плотности $g_1(y), g_2(y), g_3(y)$ распределения вероятностей операций, характеризующих временем контроля трех путей равны: $g_1(y) = [1/3(\sqrt{2\pi})] \exp\{-[y-(27)]^2/(9\sqrt{2})\}$, $g_2(y) = [1/6(\sqrt{2\pi})] \exp\{-[y-(30)]^2/(18\sqrt{2})\}$, $g_3(y) = [1/9(\sqrt{2\pi})] \exp\{-[y-(33)]^2/(27\sqrt{2})\}$.

Эквивалентная стохастическая модель процесса сборки изображена на рисунке 5. По ней необходимо найти распределения максимальной из трех случайных величин дуг $G1, G2$ и $G3$.

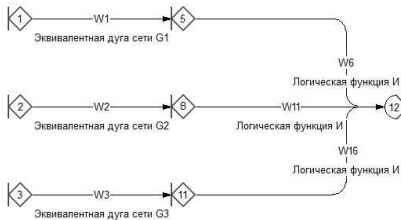


Рисунок 5 – Эквивалентная стохастическая модель процесса сборки

Функция и плотность распределения вероятностей максимальной из трех случайных величин дуг G_1 , G_2 и G_3 определяются выражениями:

$$G(t) = \prod_{i=1}^3 F_i(t),$$

$$g(t) = \frac{dG(t)}{dt} = f_1(t)F_2(t)F_3(t) + f_2(t)F_1(t)F_3(t) + f_3(t)F_1(t)F_2(t).$$

Итоговые функции и плотности распределения вероятностей процесса сборки приведены на рисунке 6, 7 (обозначены через G).

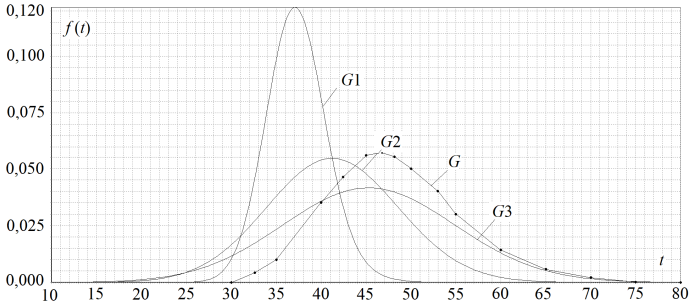


Рисунок 6 – Плотности распределения выходных операций сетей G_1 , G_2 , G_3 , G

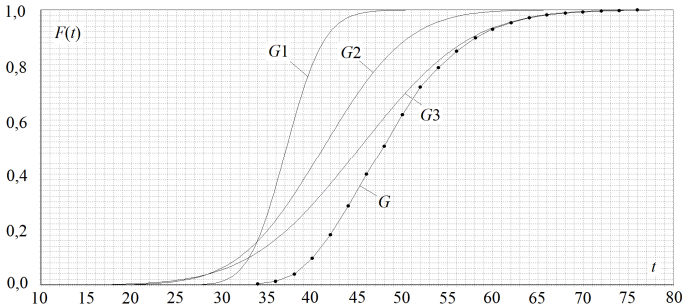


Рисунок 7 – Функции распределения выходных операций сетей G_1 , G_2 , G_3 , G

Таким образом, в главе предложена методика планирования сборочных операций с функциями контроля в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей, позволяющая повысить надежность выполнения данных операций.

Также в третьей главе предложена модель использования аналитических функций с функциями контрольных операций на основе теории вычетов. Была рассмотрена стохастическая модель сборочной операции, представленная на рисунке 8. Узел 1 имел выходную детерминированную функцию, а узел 3 входную функцию «логическое И», то есть узел выполнялся, если выполнялись все ветви, входящие в него. Дубликат узла 1 был обозначен узлом с номером 6. Тогда упрощенная стохастическая модель, содержащая функцию «логическое И» в узле 3 имела вид, представленный на рисунке 9.

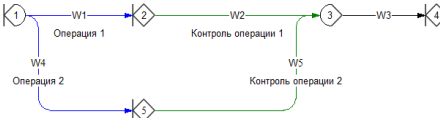


Рисунок 8 – Стохастическая сеть модели сборочной операции

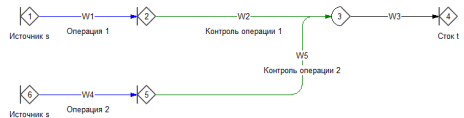


Рисунок 9 – Упрощенная стохастическая модель, содержащая функцию «логическое И» в узле 3

Время выполнения операций $W1, W2$ были распределены по показательному закону $f_1(x) = \lambda_1 e^{-\lambda_1 x}, f_2(x) = \lambda_2 e^{-\lambda_2 x}$ и функциональные зависимости операций контроля от времени выполнения операций соответственно $Y_1 = k_1 X_1, Y_2 = k_2 X_2$.

Тогда плотности распределения контрольных операций соответственно равны:

$$g_1(y) = \lambda_1 e^{-\lambda_1 \left(\frac{y}{k_1}\right)} \cdot \frac{1}{|k_1|} = \frac{\lambda_1}{k_1} e^{-\frac{\lambda_1}{k_1} y}, \quad g_2(z) = \lambda_2 e^{-\lambda_2 \left(\frac{z}{k_2}\right)} \cdot \frac{1}{|k_2|} = \frac{\lambda_2}{k_2} e^{-\frac{\lambda_2}{k_2} z}$$

Эквивалентные W -функции равны произведению производящих функций моментов дуг $W1, W2$ и $W4, W5$ соответственно равны:

$$W_{E1} = \frac{\lambda_1^2 / k_1}{(\lambda_1 - s)((\lambda_1 / k_1) - s)}, \quad W_{E2} = \frac{\lambda_2^2 / k_2}{(\lambda_2 - s)((\lambda_2 / k_2) - s)}$$

Производим замену комплексных переменных $z = -s$. Тогда получаем функции

$$\Phi_{E1}(z) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_1 / k_1}{(\lambda_1 + z)((\lambda_1 / k_1) + z)}, \quad \Phi_{E2}(z) = \frac{\lambda_2 \cdot \lambda_2 / k_2}{(\lambda_2 + z)((\lambda_2 / k_2) + z)}$$

Функции $\Phi_{E1}(z)$ и $\Phi_{E2}(z)$ имеют только полюсы первого порядка.

Если функции $\Phi_{E1}(z), \Phi_{E2}(z)$ в полуплоскости $\text{Re} z < 0$ удовлетворяют условиям леммы Жордана

$$\varphi_1(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zt} \Phi_{E1}(z) dz = \sum_{k=1}^n \text{Res} [e^{zt} \Phi_{E1}(z)], \quad \varphi_2(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zt} \Phi_{E2}(z) dz = \sum_{k=1}^n \text{Res} [e^{zt} \Phi_{E2}(z)]$$

Функции $\Phi_{E1}(z), \Phi_{E2}(z)$ равномерно сходятся к нулю относительно $\arg z$ при $|z| \rightarrow \infty$. Условия леммы Жордана выполняются.

$$\varphi_1(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zt} \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_1 / k_1}{(\lambda_1 + z)((\lambda_1 / k_1) + z)} dz = \sum_{l=1}^2 \text{Res} \left[e^{zt} \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_1 / k_1}{(\lambda_1 + z)((\lambda_1 / k_1) + z)} \right],$$

$$\varphi_2(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zt} \frac{\lambda_2 \cdot \lambda_2 / k_2}{(\lambda_2 + z)((\lambda_2 / k_2) + z)} dz = \sum_{l=1}^2 \text{Res} \left[e^{zt} \frac{\lambda_2 \cdot \lambda_2 / k_2}{(\lambda_2 + z)((\lambda_2 / k_2) + z)} \right]$$

Тогда

$$\varphi_1(t) = \lambda_1 / (1 - k_1) [e^{-\lambda_1 t} - e^{-(\lambda_1 / k_1) t}], \quad \varphi_2(t) = \lambda_2 / (1 - k_2) [e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_2 / k_2) t}]$$

Функции $\Phi_{E1}(z)$ и $\Phi_{E2}(z)$ имеют полюсы второго порядка в точке $z = -\lambda$.

Плотность распределения времени передачи файла $\varphi(x)$ находим по формуле нахождения вычетов c_{-1} от полюса $-\lambda$ второго порядка.

$$c_{-1} = \lim_{z \rightarrow -\lambda} \frac{d \left[(z + \lambda)^2 e^{z t} \Phi_E(z) \right]}{dz}$$

$$\varphi_1(t) = \varphi_2(t) = \lim_{z \rightarrow -\lambda} \frac{d \left[(z + \lambda)^2 e^{z t} \frac{\lambda^2}{(\lambda + z)^2} \right]}{dz} = \lambda^2 t e^{-\lambda t}$$

Было найдено время реакции на активизацию входов сборочной системы для двух случаев:

- 1) система начинает сборку при активизации (срабатывании) обоих входов;
- 2) система начинает функционирование при первом срабатывании какого-либо входа.

В первом случае срабатывали оба входа.

$$\varphi(t) = \varphi_1(t) F_2(t) + F_1(t) \varphi_2(t).$$

Во втором случае срабатывал один из входов.

$$\varphi(t) = \varphi_1(t) [1 - F_2(t)] + [1 - F_1(t)] \varphi_2(t).$$

Таким образом, в третьей главе предложена модель использования аналитических функций с функциями контрольных операций для получения законов распределения вероятностей функционально зависимых контрольных операций промышленных сетей на основе моделей GERT-сетей.

Также в третьей главе разработана методика получения контрольной выходной операции промышленной сети на основе моделей GERT-сетей с заданным распределением путем функционального преобразования с использованием метода обратной функции.

На практике часто встречаются преобразования контрольных операций типа $Y = kX$, $Y = \sqrt{X}$, $Y = X^n$, $Y = |X|$. Это возможно, если эта зависимость заранее известна. При проектировании промышленных сетей часто возникает необходимость решить обратную задачу: какую функцию распределения необходимо выбрать для зависимых контрольных операций, чтобы функция распределения контрольной операции, части еще не созданной промышленной сети, или всей промышленной сети на основе моделей GERT-сетей, в целом, соответствовала определенным требованиям. В этом случае необходимо рассмотреть два случая:

– не меняется выполняемая операция, часть еще не созданной промышленной сети на основе моделей GERT-сетей, или вся промышленная сеть на основе моделей GERT-сетей в целом. На это затрачивается определенное время, и тогда должно выполняться условие $G(y) > F(x)$, где $G(y)$ – функция распределения будущей операции, части еще не созданной промышленной сети на основе моделей GERT-сетей;

– нужно изменить функцию распределения уже существующей операции, часть еще не созданной промышленной сети, или всей промышленной сети на основе моделей GERT-сетей в целом. Тогда на функцию распределения $G(y)$ не накладывает-

ся ограничений, кроме того, что должно выполняться условие интегрирования формулы обращения.

Рассмотрена задача получения контрольной операции Y с заданным дискретным распределением путем функционального преобразования другой случайной величины. Задача формулировалась следующим образом: в распоряжении имелась случайная величина X с заданной плотностью $f(x)$. Требовалось определить, какому функциональному преобразованию $Y = \varphi(x)$ ее надо подвергнуть, чтобы контрольная операция Y имела заданное распределение.

Для решения задачи использовался метод обратной функции. Исходной случайной величиной X являлась непрерывная случайная величина, распределенная с постоянной плотностью на интервале $(0,1)$.

Необходимо, чтобы функциональным преобразованием $Y = \varphi(x)$ из нее получалась контрольная операция с заданной функцией распределения $G(y)$. Для этого случайная величина X подвергалась функциональному преобразованию $Y = G^{-1}(X)$, где $G^{-1}(X)$ – функция, обратная требуемой функции распределения $G(y)$. Если эта функция непрерывна и строго монотонна, то и обратная функция $G^{-1}(X)$ так же непрерывна. В этом случае функция распределения контрольной операции Y

$$P\{Y < y\} = P\{X < G(y)\} = G(y).$$

Таким образом, в главе предложена методика получения контрольной выходной операции промышленной сети на основе моделей GERT-сетей с заданным распределением путем функционального преобразования.

Также в третьей главе разработана методика преобразования структуры промышленных сетей на основе моделей GERT-сетей с положительными и отрицательными случайными величинами.

Рассматривалось последовательное и параллельное соединение дуг с положительными и отрицательными случайными величинами. Показана обратимость этих операций.

Соединение «дуга-петля» с положительными и отрицательными случайными величинами показано на рисунке 10.

Эквивалентная W -функция

$$W_{E+-} = \frac{pM_1(s)M_2(s)}{1 - qM_3(s)M_4(s)}.$$

Данное соединение было представлено в ациклическом виде. Были получены комбинации последовательно и параллельно соединенных дуг. Формула получена как бесконечная убывающая геометрическая прогрессия со знаменателем $qM_3(s)M_4(s)$.

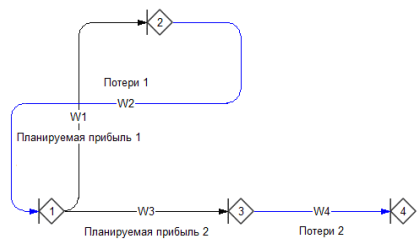


Рисунок 10 – Схема соединения «дуга-петля» с положительными и отрицательными случайными величинами $G(y)$

Поскольку преобразование «дуга-петля» является комбинацией преобразований последовательных и параллельных дуг, то они являются обратимыми.

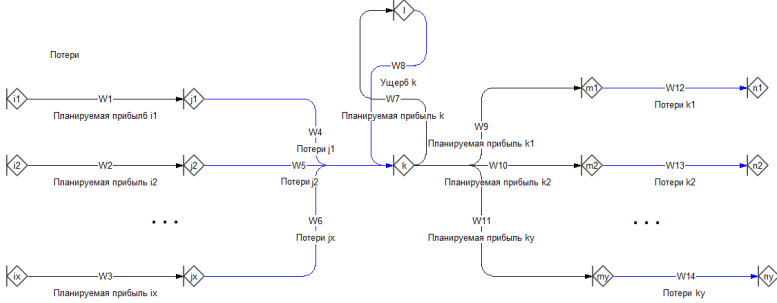


Рисунок 11 – Модель GERT-сети с планируемой прибылью и потерям с входными, выходными дугами и фрагментом «дуга-петля» с положительными и отрицательными случайными величинами

Рассмотрены эквивалентные преобразования промышленных сетей на основе моделей GERT-сетей с положительными и отрицательными случайными величинами. Структура промышленной сети на основе моделей GERT-сетей пошагово упрощалась за счет исключения какого-либо узла. В выбранный узел входили дуги из других узлов j_1, j_2, \dots, j_x и выходили дуги в другие узлы m_1, m_2, \dots, m_y . Кроме того, выбранный узел k образовывал промежуточный фрагмент «дуга» (рисунок 11).

Предварительно вычислялась фактическая прибыль во всей сети (рисунок 12).

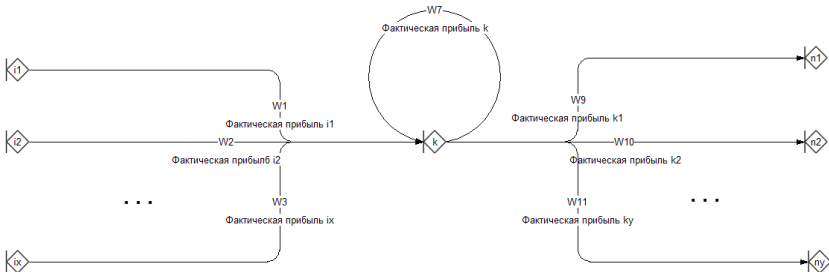


Рисунок 12 – Модель GERT-сети с фактической прибылью с выходными, выходными дугами и фрагментом «дуги-петля» с положительными и отрицательными случайными величинами

В процессе преобразований дублированием узла k ликвидировались «дуги» в этом узле путем пересчета W -функций:

$$W_{9E} = \frac{p_1 W_9}{1 - (1 - p_1) W_7}, W_{10E} = \frac{p_2 W_{10}}{1 - (1 - p_2) W_7}, \dots, W_{11E} = \frac{p_y W_{11}}{1 - (1 - p_y) W_7},$$

где p_1, p_2, \dots, p_y – вероятности выбора дуг $W_9, W_{10}, \dots, W_{11}$.

После исключения узла k образовывался фрагмент модели GERT-сетей. Последовательно исключались все узлы, кроме узла-истока и узла-стока, образующих

единственную эквивалентную дугу всей сети. Поскольку после исключения ущерба все элементарные преобразования (последовательно соединенные дуги, комбинирование распределений) были обратимы, то из эквивалентной дуги GERT-сети можно было восстановить всю сеть.

Таким образом, в третьей главе разработана методика планирования прибыли с учетом возможных потерь за счет введения в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей отрицательных и положительных случайных величин.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанного математического обеспечения автоматизированного проектирования промышленных сетей. Рассмотрена модель передачи данных на основе метода коммутации пакетов с учетом контрольных операций, определяющихся функциональной зависимостью времени передачи пакетов в телекоммуникационных сетях (рисунок 13).

На основе метода коммутации пакетов передаваемое сообщение в узле отправителя разбивалось на некоторые пакеты, передающие по некоторым маршрутам к узлу получателя. На каждом маршруте добавлялись контрольные операции передаваемых пакетов и обратные сообщения или квитанции (контроль правильности передаваемых пакетов на маршрутах). Время контрольных операций определялось функциональной зависимостью случайных величин времени передачи пакета соответствующих маршрутов. Для получения распределения времени передачи контрольных сообщений и распределения времени на каждом маршруте было предложено использовать теорию вычетов.

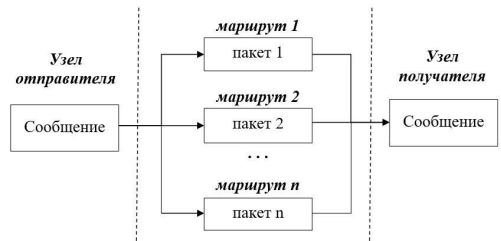


Рисунок 13 – Модель передачи данных в телекоммуникационных сетях на основе метода коммутации пакетов

Модель передачи данных в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей на основе метода коммутации пакетов изображена на рисунке 14.

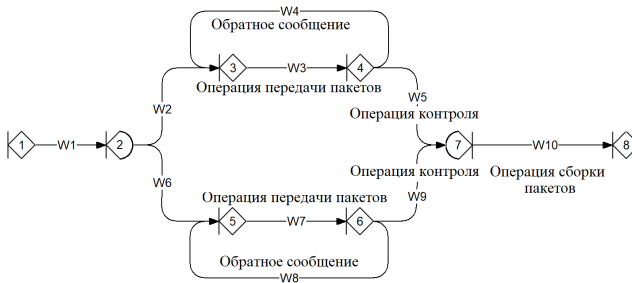


Рисунок 14 – GERT-сеть передачи данных в промышленных сетях на основе метода коммутации пакетов

Время передачи данных на маршрутах было распределено по экспоненциальному закону с параметром $\lambda_1 = 1$ (для 1-го маршрута), $\lambda_2 = 1,2$ (для 2-ого маршрута). Время проверки передающих пакетов линейно зависело от времени передачи пакетов по соответствующих маршрутах по функции: $Y = X/5$. Время передачи обратной квитанции линейно зависело от времени передачи данных $Y = X/5$ и вероятность этой операция равна 0,1.

GERT-модели промышленных сетей по первому и второму маршруту приведены на рисунках 15-16.

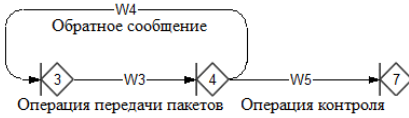


Рисунок 15 – GERT-сеть по первому маршруту

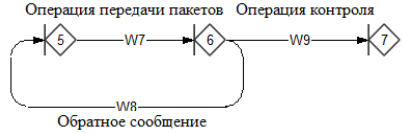


Рисунок 16 – GERT-сеть по второму маршруту

Плотности распределения времени контрольных операций равны:

$$g_1(y) = 5\lambda_1 e^{-\lambda_1 y} = 5e^{-5y}; g_2(y) = 5\lambda_2 e^{-5\lambda_2 y} = 6e^{-6y}.$$

Плотности распределения времени передачи обратных сообщений квитанций равны: $k_1(y) = 5\lambda_1 e^{-\lambda_1 y} = 5e^{-5y}; k_2(y) = 5\lambda_2 e^{-5\lambda_2 y} = 6e^{-6y}$.

Эквивалентная W -функция времени передачи пакетов первого и второго маршрута равна:

$$W_{E1}(s) = \frac{4,5}{s^2 - 6s + 4,5}, W_{E2}(s) = \frac{6,48}{s^2 - 7,2s + 6,48}$$

С использованием теории вычетов получены плотности и функции распределения времени передачи пакетов первого и второго маршрута:

$$\varphi_1(t) = -1,06e^{-5,12t} + 1,05e^{-0,87t}, \varphi_2(t) = -1,27e^{-6,14t} + 1,27e^{-1,05t}$$

$$F_1(t) = -0,207(1 - e^{-5,12t}) + 1,206(1 - e^{-0,87t}), F_2(t) = -0,207(1 - e^{-6,14t}) + 1,209(1 - e^{-1,05t})$$

Функция и плотность распределения вероятностей времени передачи данных в промышленных сетях к сборке пакетов на узле назначения соответственно равны:

$$G(y) = \prod_{i=1}^n F_i(y) = F_1(y)F_2(y)$$

$$= 1 + 0,207e^{-6,14t} + 1,209e^{-1,05t} - 1,206e^{-5,12t} - 0,042e^{-11,26t} + 0,25e^{-6,17t} - 1,206e^{-0,87t} - 0,24e^{-7,01t} + 1,45e^{-1,12t}$$

$$g(t) = \sum_{j=1}^n \frac{f_j(y) \prod_{i=1}^n F_i(y)}{F_j(y)} = f_1(y)F_2(y) + f_2(y)F_1(y)$$

$$= -1,5e^{-5,12t} + 1,48e^{-0,87t} - 0,56e^{-11,26t} + 0,22e^{-7,01t} + 1,02e^{-6,17t} - 1,28e^{-1,92t} - 1,79e^{-6,14t} + 1,79e^{-1,05t}$$

Соответствующие графики функции и плотности распределения времени передачи данных приведены на рисунках 17, 18.

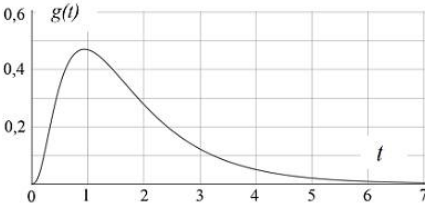


Рисунок 17 – Плотность распределения вероятностей времени передачи данных в промышленных сетях

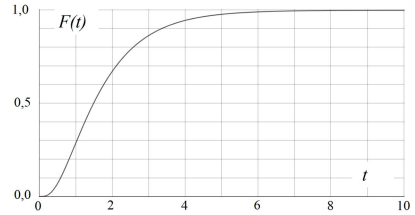


Рисунок 18 – Функция распределения вероятностей времени передачи данных в промышленных сетях

Приведенная модель описывалась экспоненциальными распределениями. Для ее анализа использовалась теория вычетов, а плотность распределения выходной операции применялась для нахождения функционально зависимых контрольных операций в приложениях:

- а) расчета времени передачи файла по каналу связи вместе с проверкой достоверности и значимости содержимого файла.
- б) оценки вероятностно-временных характеристик систем с потерей ценности информации со временем (систем со старением информации);
- в) моделирования систем массового обслуживания $M/G/1$.

В первом случае информация, переданная в файле по каналу связи, перепроверялась прежде, чем она была отправлена в вышестоящие инстанции. Таким образом, общее время ожидания определялось как сумма времени передачи файла в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей с коммутацией пакетов связи и времени перепроверки. Величина времени перепроверки зависела от времени передачи файла по выражению $Y = \sqrt[3]{X}$. Случайная величина X имела плотность распределения:

$$\varphi(t) = -1,5e^{-5,12t} + 1,48e^{-0,87t} - 0,56e^{-11,26t} + 0,22e^{-7,01t} + 1,02e^{-6,17t} - 1,28e^{-1,92t} - 1,79e^{-6,14t} + 1,79e^{-1,05t}.$$

Обратная функция $\phi(y) = y^2$. Значение модуля производной от этой функции $|2y|$.

В итоге была получена плотность распределения времени перепроверки в промышленной сети на основе моделей GERT-сетей:

$$g(y) = |3y^2|(-1,5e^{-5,12y^3} + 1,48e^{-0,87y^3} - 0,56e^{-11,26y^3} + 0,22e^{-7,01y^3} + 1,02e^{-6,17y^3} - 1,28e^{-1,92y^3} - 1,79e^{-6,14y^3} + 1,79e^{-1,05y^3})$$

График плотности $g(y)$ изображен на рисунке 19.

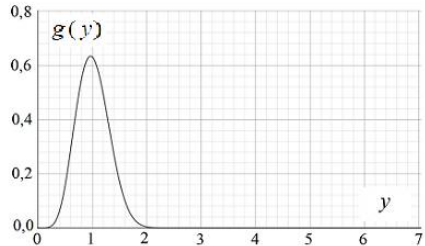


Рисунок 19 – Плотность распределения времени выполнения контрольной операции в промышленных сетях

Для оценки вероятностно-временных характеристик систем с потерей ценности информации со временем была предложена следующая методика. Плотность $\varphi(t)$ характеризовала время передачи по каналу связи потока пакетов. Среди передаваемых пакетов встречались такие, для которых было установлено предельно допусти-

мое время передачи α . Чтобы избежать засорения канала ненужной более информацией просроченные пакеты выбрасывались из системы. Иными словами, необходимо было найти вероятность того, что $P\{\xi < \alpha\}$. При этом также рассматривались распределения времени передачи пакетов, превышающих контрольное время α . Это случалось, когда «запоздавшие» пакеты не уничтожались, а обрабатывались. Тогда необходимо было знать вероятность того, что $P\{\xi > \alpha\}$. Другим важным случаем являлось попадание случайного времени передачи ξ в интервал $\alpha \leq \xi \leq \beta$.

В том случае, когда требовалось найти условное распределение $f(t)$ того, что всевозможные случайные исходы не превышали α , получали:

$$f(t) = \frac{-1,5e^{-5,12t} + 1,48e^{-0,87t} - 0,56e^{-11,26t} + 0,22e^{-7,01t} + 1,02e^{-6,17t} - 1,28e^{-1,92t} - 1,79e^{-6,14t} + 1,79e^{-1,05t}}{\int_0^{\alpha} (-1,5e^{-5,12t} + 1,48e^{-0,87t} - 0,56e^{-11,26t} + 0,22e^{-7,01t} + 1,02e^{-6,17t} - 1,28e^{-1,92t} - 1,79e^{-6,14t} + 1,79e^{-1,05t}) dt}$$

$$= \frac{-1,5e^{-5,12t} + 1,48e^{-0,87t} - 0,56e^{-11,26t} + 0,22e^{-7,0t} + 1,02e^{-6,17t} - 1,28e^{-1,92t} - 1,79e^{-6,14t} + 1,79e^{-1,05t}}{-0,293(1 - e^{-5,12\alpha}) - 1,70(1 - e^{-0,87\alpha}) - 0,049(1 - e^{-11,26\alpha}) + 0,031(1 - e^{-7,01\alpha}) + 0,165(1 - e^{-6,17\alpha}) - 0,664(1 - e^{-1,92\alpha}) - 0,292(1 - e^{-6,14\alpha}) + 0,705(1 - e^{-1,05\alpha})}$$

при $t < \alpha$; $f(t) = 0$ при $t \geq \alpha$ (округлено до тысячных). Если интересующие нас случайные исходы попадали на отрезок $\alpha \leq \xi \leq \beta$, то ординаты условной плотности распределения $f^*(t)$ на этом отрезке увеличивались на величину суммы вероятностей того, что $P\{\xi < \alpha\} \cup P\{\xi > \beta\}$, а вероятность того, что условная случайная величина не попадет на отрезок $\alpha \leq \xi \leq \beta$, равнялась 1. Этот случай на практике связан с контролем качества передачи речевых IP-пакетов.

Сформулирована задача построения условной плотности распределения, когда принимаются во внимание только те исходы, когда $\xi > \alpha$. Тогда значения условной плотности $f^*(t)$ увеличиваются по сравнению с плотностью $f(t)$ на $P\{\xi < \alpha\}$. Значения $f^*(t) = 0$ при $t < \alpha$. На практике такая плотность может использоваться тогда, когда «опоздавшие» пакеты не уничтожаются, а обрабатываются по специальным алгоритмам.

Рассмотрена задача оценки вероятностно-временных характеристик систем массового обслуживания типа $M/G/1$ с обслуживающим прибором с операциями, зависящими от функций от случайных величин. Были найдены первый μ_1 и второй μ_2 моменты относительно начала координат случайной величины ξ с плотностью распределения вероятностей $f(t)$.

$$\mu_1 = \int_0^{\infty} t (-1,5e^{-5,12t} + 1,48e^{-0,87t} - 0,56e^{-11,26t} + 0,22e^{-7,01t} + 1,02e^{-6,17t} - 1,28e^{-1,92t} - 1,79e^{-6,14t} + 1,79e^{-1,05t}) dt = 21,269$$

$$\mu_2 = \int_0^{\infty} t^2 (-1,5e^{-5,12t} + 1,48e^{-0,87t} - 0,56e^{-11,26t} + 0,22e^{-7,01t} + 1,02e^{-6,17t} - 1,28e^{-1,92t} - 1,79e^{-6,14t} + 1,79e^{-1,05t}) dt = 624,632$$

Тогда дисперсия $\sigma^2 = \mu_2 - \mu_1^2 = 924,632 - 21,269^2 = 472,267$. Квадратичный коэффициент вариации C^2 равен: $C^2 = \sigma^2 / \mu_1^2 = 1,044$. Для СМО $M/G/1$ справедливо $\bar{N} = \rho + \rho^2(1 + C^2) / [2(1 - \rho)]$, где \bar{N} – среднее число заявок в системе, $\rho = \lambda / \mu_1$ – нагрузка системы, равная отношению средней интенсивности простейшего входного

потока к среднему времени обслуживания $\bar{T} = \mu_1 + \rho \mu_1 (1 + C^2) / [2(1 - \rho)]$, где \bar{T} – среднее время пребывания заявок в системе. Формулы приобретают вид

$$\bar{N} = \rho + 1,022 \rho^2 / (1 - \rho); \quad \bar{T} = 21,269 + 21,737 \rho / (1 - \rho).$$

Соответствующие графики функций приведены на рисунках 20 и 21.

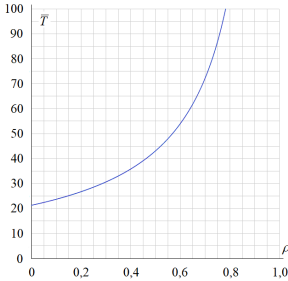


Рисунок 20 – Зависимость $\bar{N} = f(\rho)$

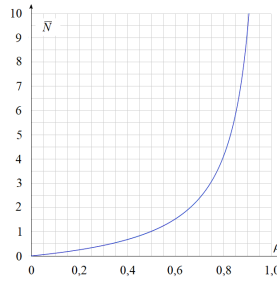


Рисунок 21 – Зависимость $\bar{T} = f(\rho)$

Полученные зависимости позволили определить допустимое значение входного потока, а также учесть, что значение ρ выбирается в пределах 0,7 – 0,75.

Таким образом, в четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанного математического обеспечения автоматизированного проектирования промышленных сетей с функционально зависимыми контрольными операциями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных научных исследований и разработок получены следующие результаты:

1 Проведено исследование и анализ функциональных зависимостей контрольных операций в промышленных сетях на основе математического аппарата GERT-сетей.

2 Разработана методика расчета распределения Кокса на основе моделей GERT-сетей. Применение предложенной методики позволило повысить эффективность информационных процессов промышленных сетей.

3 Разработана методика планирования сборочных операций стохастической структуры для решения задач с функциями от случайных величин на основе моделей GERT-сетей. Применение предложенной методики позволило повысить надежность выполнения данных операций.

4 Разработана модель использования аналитических функций в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей для получения плотности и функции распределения вероятностей функционально зависимых контрольных операций. Применение предложенной модели позволило провести математические преобразования, выполняемые при анализе процессов передачи информации с учетом отношений предшествования.

5 Разработана методика планирования прибыли с учетом возможных потерь за счет введения в промышленных сетях на основе моделей GERT-сетей отрицательных и положительных случайных величин.

Проведенная экспериментальная проверка показала корректность основных положений и методов исследований. Разработанная система моделирования и планирования проектов позволила повысить эффективность информационных и технологических процессов в промышленных сетях, а также расширить функциональные возможности математического аппарата GERT-сетей.

Разработанные инструментальные средства применялись на практике при организации сетевого планирования информационных и технологических процессов в ООО «Beetech Technology And Service Multimedia (Вьетнам)» и в ООО «Technology Win Win Media» (Вьетнам), а также при проведении учебных занятий на кафедре САПР ВС РГРТУ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Нгуен А. З. Процедуры поиска объектов на основе использования GERT-сетей / В. П. Корячко, А. П. Шибанов, В. А. Шибанов, А. З. Нгуен // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 62. – С. 58-63.

2. Нгуен А. З. 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. Нгуен А. З. 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. – № 8 (4). – С. 1-10.

Статьи в сборниках научных трудов и тезисы докладов конференций:

4. Нгуен А. З. Использование стохастических сетей при планировании сборочных операций с функциями от случайных величин / А. П. Шибанов, А. З. Нгуен // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – № 69. – С. 86-92.

5. Нгуен А. З. Аналитические модели телекоммуникационных каналов с контрольными операциями / А. П. Шибанов, А. З. Нгуен, А. М. Фам // Радиотехника. – 2019. – № 11. – С. 35-40.

6. Нгуен А. З. 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.

7. Нгуен А. З. Система космической связи с резервированием кадров и использованием GERT-сетей / А. З. Нгуен, А. П. Шибанов // межвуз. сб. науч. тр. «Информационные технологии». – Рязань, 2019. – С. 173-177.

8. Нгуен А. З. Проектирование сети передачи данных при испытаниях передвижных технических комплексов / А. П. Шибанов, В. А. Шибанов, А. З. Нгуен // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы II Всероссийской научно-технической конференции / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2017. – С. 52-57.

9. Нгуен А. З. Планирование проектов на основе GERT-сетей / А. П. Шибанов, Д. М. Скуднев, А. З. Нгуен // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы III Всероссийской научно-технической конференции / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2018. – С. 112-117.

10. Нгуен А. З. Применение GERT-сетей при использовании временных функциональных зависимостей / А. З. Нгуен, А. П. Шибанов // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIV Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2019. – С. 74 -75.

11. Нгуен А. З. Применение GERT-сетей для планирования проектов с функционально зависимыми случайными операциями / Д. А. Перепелкин, А. З. Нгуен // 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. 139-140.

12. Нгуен А. З. Математическая модель телекоммуникационных каналов с функционально зависимыми контрольными операциями / Д. А. Перепелкин, А. З. Нгуен // 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. 140-142.

НГУЕН Ань Зунг

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЕЙ
С ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАВИСИМЫМИ КОНТРОЛЬНЫМИ
ОПЕРАЦИЯМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____, 21. 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.