

УДК 656.07

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСПРЕДЕЛЕННОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В.М. Гостев (Казань)

Введение

Сеть передачи данных (СПД, коммуникационная подсеть, Core Network) представляет собой структурно-функциональное ядро территориально распределенной инфокоммуникационной сети (ИКС). Аппаратно-программную основу СПД образуют узлы коммутации (УК), соединенные каналами передачи данных (КПД). УК осуществляют управление процессами передачи потоков данных по СПД и реализуются обычно на базе высокопроизводительных магистральных маршрутизаторов.

Среди комплекса проблем, возникающих в течение жизненного цикла СПД, особое место занимает проблема системного (концептуального) проектирования: от качества решений, принимаемых на данном этапе, во многом зависит эффективность функционирования информационных систем, создаваемых на основе ИКС.

Проблема проектирования СПД является сложной многокритериальной проблемой, для которой характерны комплексный характер, противоречивость и плохая формализуемость совокупности требований, предъявляемых к проектируемому объекту, необходимость тщательного учета многочисленных взаимосвязанных факторов различной природы. Несмотря на постоянное совершенствование инфокоммуникационных технологий и, вследствие этого, снижение стоимости компонентов КПД и УК, создание новой или модернизация уже существующей СПД остаются весьма дорогостоящими мероприятиями. Поэтому особую актуальность имеет разработка методов, технологий и систем оптимизации проектирования СПД. Для комплексного решения данной проблемы требуется разработка адекватных математических моделей, вычислительно эффективных методов и технологий, которые позволяли бы проводить исследования процессов передачи данных, формирование и оптимизацию проекта при учете важнейших требований, предъявляемых к современным СПД.

Основные задачи исследований СПД можно сформулировать следующим образом [1]:

- исследование характера и параметров информационных потоков на входе сети и построение соответствующих математических моделей;
- исследование методов анализа и синтеза структуры сети с учетом новых моделей входящих потоков, разнородности видов информации, новых требований к качеству обслуживания;
- определение параметров и критериев качества обслуживания пользователей сети;
- определение критериев эффективности построения сети и разработка соответствующих методов оптимизации;
- прогнозирование состояния сети при изменениях внешней нагрузки.

Один из возможных подходов к решению проблемы повышения эффективности исследований в области проектирования СПД – создание специализированной системы оптимизации проектирования [2].

Система оптимизации проектирования (СОПР СПД) позволяет решать задачи структурно-топологического и параметрического проектирования, проводить расчеты

и оценки параметров проектируемых сетей на основе использования их моделей, сравнение различных проектных решений и оценку их эффективности, оптимизацию проектных решений по критериям стоимости, надежности, производительности и величин временных задержек.

Логическая структура СОПР СПД

Логическую структуру СОПР СПД составляет ряд функциональных и обеспечивающих подсистем (рис.1).

Функциональные подсистемы реализуют определенный этап проектирования или группу непосредственно связанных проектных задач (выполняют проектные процедуры). Обеспечивающие подсистемы, имеющие общесистемное назначение, осуществляют поддержку работы функциональных подсистем. Совокупность обеспечивающих подсистем образует системную среду (оболочку) СОПР. Основными функциями системной среды СОПР являются управление процессом проектирования, управление данными, реализация интерфейса с проектировщиком. Функциональные подсистемы обеспечивают решение проектных задач в автоматическом и ручном режимах.

Подсистема структурно-топологического проектирования (СТП) включает модули, реализующие методы оптимизации проектирования топологической структуры СПД и средства поддержки ручного проектирования (построение начальной топологии сети, ее дальнейшее достраивание, улучшение).

Подсистема выбора маршрутов (ВМ) включает модули решения задач маршрутизации потоков данных.

Подсистема выбора пропускных способностей включает модули, реализующие методы оптимального выбора пропускных способностей УК и КПД, средства достраивания и улучшения вариантов, средства поддержки работы с вариантами.

Сложность рассматриваемой проблемы, большое количество параметров, условий и ограничений различного уровня детализации не позволяют достаточно полно описывать и исследовать СПД в рамках единой математической модели. Для повышения эффективности процесса проектирования в СОПР реализована технология комплексного моделирования: в процессе формирования и анализа вариантов решений применяются как аналитические, так и имитационные модели [3].

Имитационные модели могут быть использованы для обоснования и верификации разрабатываемых аналитических моделей элементов СПД, оценки эффективности эвристических алгоритмов, построенных на базе аналитических моделей, а также для оценки эффективности проектов СПД, разрабатываемых на основе аналитических моделей. Использование имитационных моделей требует больших затрат времени для получения результатов, однако позволяет отказаться от некоторых упрощений и получить более точные оценки характеристик СПД по сравнению с аналитическими моделями.

Комплексное использование аналитических и имитационных моделей положено в основу технологии оценки качества проектируемых сетей на базе программного комплекса распределенного имитационного моделирования.

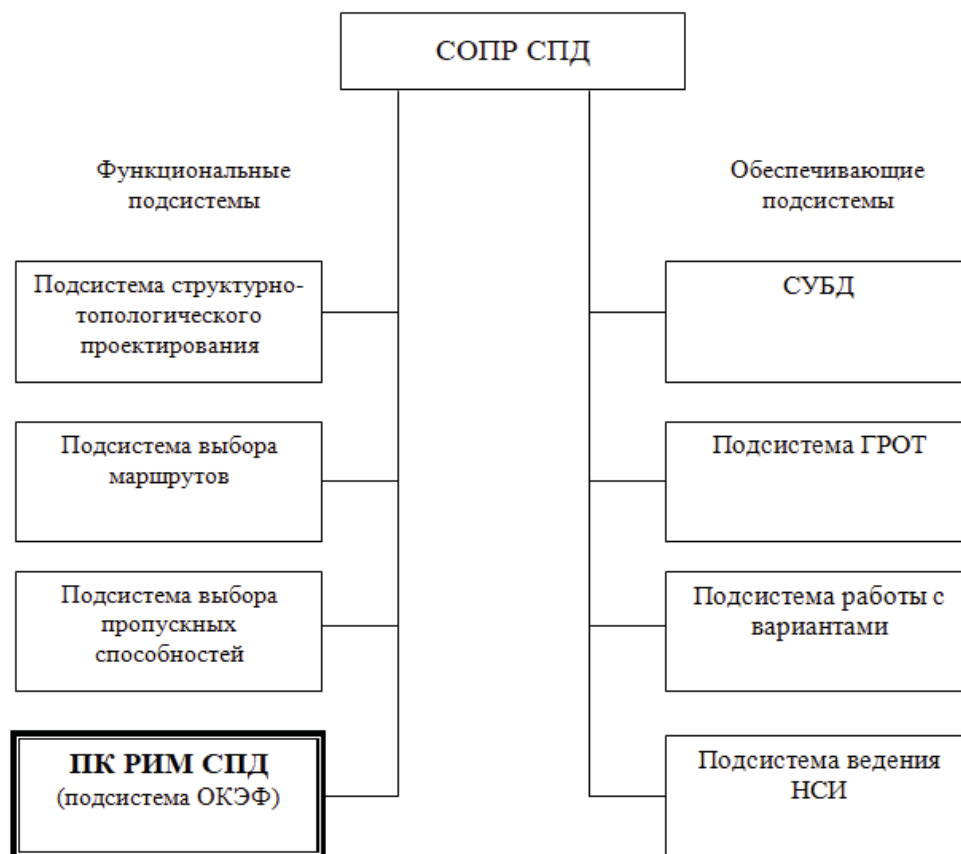


Рис. 1. Логическая структура СОПР СПД

На рис. 1 приняты следующие сокращения: ПК РИМ СПД – программный комплекс распределенного имитационного моделирования; ОКЭФ – оценка качества и эффективности функционирования; ГРОТ – графическое отображение; НСИ – нормативно-справочная информация.

Программный комплекс распределенного имитационного моделирования как подсистема СОПР СПД

Для обоснования и верификации разрабатываемых аналитических моделей СПД, а также для оценки эффективности проектов, разрабатываемых на основе аналитических моделей, в состав СОПР СПД включена подсистема оценки качества и эффективности функционирования (ОКЭФ).

Подсистема ОКЭФ создается на базе программного комплекса распределенного имитационного моделирования сетей передачи данных (рис.2).

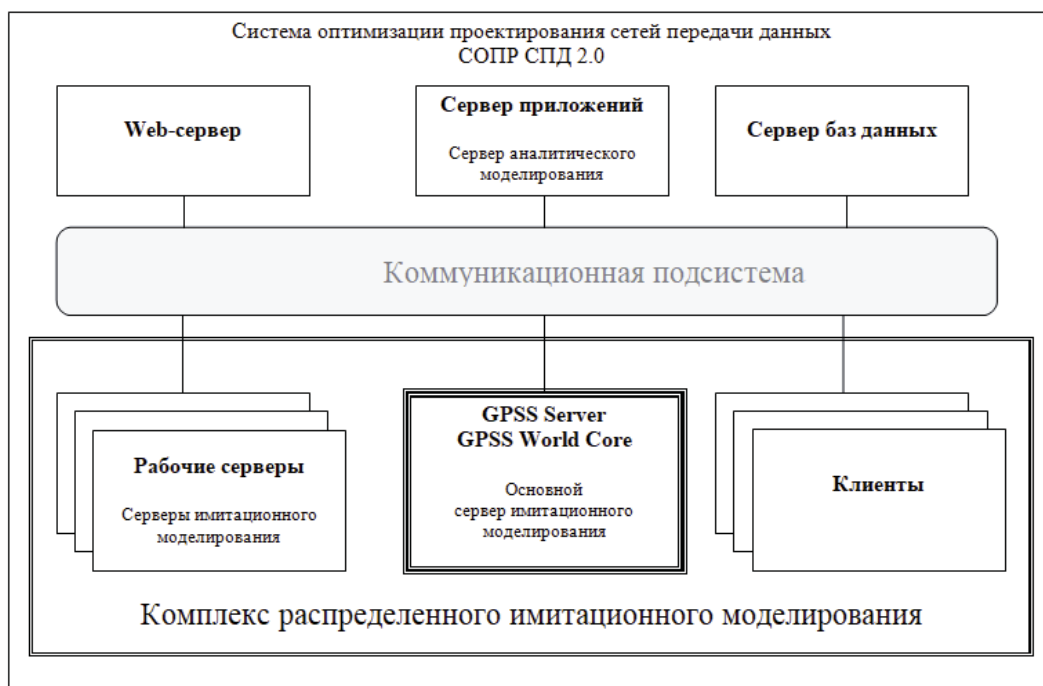


Рис 2. Архитектура СОПР СПД

Программный комплекс распределенного имитационного моделирования сетей передачи данных (ПК РИМ СПД) позволяет:

- проводить имитационное моделирование процессов передачи информационных потоков в СПД различных конфигураций на основе моделей систем массового обслуживания, детально анализировать работу компонентов сети (узлы, каналы, источники внешней нагрузки);
- проводить эксперименты в процессе проектирования СПД (связанные с анализом, синтезом сетей и их компонентов – узлов коммутации, каналов передачи данных);
- проводить исследования сетей с имитацией критических условий эксплуатации (отказы узлов и/или каналов, резкое увеличение объема и/или изменение структуры внешней нагрузки) с целью выявления «узких мест» проектируемой сети.

В состав распределенной системы имитационного моделирования входят:

- основной сервер удаленного моделирования GPSS;
- рабочие серверы удаленного моделирования GPSS;
- клиенты;
- коммуникационная подсистема.

Имитационные модели сетей строятся автоматически с помощью специального генератора моделей (в составе подсистемы ОКЭФ). На основе анализа структуры варианта сети генератор формирует модель на языке GPSS, которая затем выполняется в среде моделирования ALINA GPSS [4]. В процессе моделирования используются библиотеки, содержащие модели отдельных функциональных модулей узлов коммутации (процессоры, порты, буферы и т.д.) и каналов передачи данных.

В качестве ядра имитационного моделирования используется общецелевая система имитационного моделирования GPSS World Core [5]. Управление процессами исполнения модели моделирующим ядром осуществляет сервер удаленного моделирования (СУМ) GPSS [6]. Программа «Сервер удаленного моделирования» предназначена для автоматизации процессов обработки потока заданий на проведение

имитационных экспериментов с клиентских мест в рамках вычислительной сети или в облаках. СУМ GPSS обеспечивает поддержку работы пользователей, предоставляя им сетевой доступ (например, через локальную сеть или интернет) к моделирующим ядрам (установленным на множестве выделенных рабочих серверов). Используя ресурсы СУМ GPSS, можно установить несколько моделирующих ядер на разные компьютеры (рабочие серверы), связать их с помощью СУМ GPSS и получить систему для параллельного проведения экспериментов. СУМ GPSS автоматически выберет наименее загруженный рабочий сервер и отправит ему модель, являющуюся частью эксперимента. Основная функция рабочего сервера – исполнение процессов моделирования: получение модели от клиента с использованием средств сетевого взаимодействия удаленных процессов – запуск моделирующего ядра – формирование файлов с результатами моделирования – передача файлов с результатами клиенту.

По окончании эксперимента все результаты будут собраны вместе. Распараллеливание экспериментов происходит автоматически и не требует вмешательства пользователя. Такая возможность проведения экспериментов может оказаться очень важной, например, для организации и проведения лабораторных занятий в вузах, одновременного проведения серий из большого количества экспериментов, или при отсутствии коммерческой лицензии на GPSS World.

Программное обеспечение серверной части комплекса

Программное обеспечение основного сервера GPSS и рабочих серверов представляет собой совокупность проектов .NET [7]. Кроссплатформенность .NET обеспечивается благодаря использованию высокоуровневых языков программирования, сред разработки и выполнения, поддерживающих условную компиляцию, компоновку и выполнение кода для различных платформ. Приложения сервера GPSS и рабочих серверов являются многопоточными [8]. При помощи многопоточности одновременно выполняется ряд задач – несколько моделирующих ядер. При этом асинхронные методы, реализующие функции моделирующих ядер, выполняются в отдельных потоках. При обмене данными (файл модели, входные параметры, выходные значения) клиент работает с каждым сервером в отдельном потоке. Загрузка модели, загрузка параметров и выполнение вычислений также происходят в отдельном потоке.

Программное обеспечение клиентской части комплекса

Программное обеспечение клиентской части (клиентское ПО) – компонент программного комплекса РИМ СПД, который выполняется на стороне пользователя (клиента) и отвечает за взаимодействие с ним, а также за передачу запросов серверной части и отображение полученных данных. Оно включает в себя интерфейс приложения, обеспечивая взаимодействие с пользователем и визуальное представление информации.

Клиентская часть комплекса представляет собой кроссплатформенное приложение на базе .NET [7]. Интерфейс пользователя создан с использованием кроссплатформенного фреймворка Avalonia UI [9]. Таким образом, клиентское приложение может выполняться на компьютерах под управлением различных операционных систем – как Windows, так и Linux.

При визуализации проектируемой сети может быть использована картографическая подложка. Работа с картами обеспечивается программными компонентами, реализованными на базе библиотеки GMap.NET [10]. Эта библиотека позволяет интегрировать карты от различных провайдеров (Google, OpenStreetMap и др.) в настольные приложения. Важная особенность GMap.NET – поддержка офлайн-режима за счет кэширования – позволяет работать с картами при отсутствии доступа в интернет.

Пример комплексного моделирования СПД [3]

Среди характеристик СПД важнейшее место занимают величины задержек пакетов. В [11] предложен способ оценки средней задержки пакетов при передаче по СПД с учетом задержек в узлах коммутации. При этом для оценки задержек в каналах используются известные подходы, основанные на использовании моделей М/М/1 и М/Д/1 [12]. Для оценки задержек пакетов в УК использован аналогичный подход.

Для оценки предложенного подхода (проверки адекватности аналитической модели) на базе СОПР была проведена серия вычислительных экспериментов по расчету характеристик СПД с целью исследования зависимости среднего времени задержки пакетов от характера внешней нагрузки на сеть. Для сетей с различным количеством УК (от 4 до 50) моделировалось изменение объема и структуры информационных потоков от пользователей СПД. Рассматривались случаи симметричной и несимметричной внешней нагрузки на СПД, различные законы распределения интервалов поступления пакетов от внешних источников, а также времени обслуживания (обработки пакетов) в УК и КПД.

Один из типичных результатов экспериментов показан на рис. 3. Здесь зависимости средних задержек от суммарной нагрузки на СПД получены для сети из 10 узлов (размер пакетов 1500 байт). Для проектируемой СПД с ограничением на среднюю задержку пакетов 6 мс на нагрузке 120 Мбит/с с помощью подсистемы ОКЭФ СОПР была проведена серия испытаний. Использованы четыре метода оценки задержек: аналитическое и имитационное моделирование УК и КПД с использованием моделей М/М/1 и М/Д/1.

Таким образом, эксперименты показали, что предложенный метод аналитической оценки задержек в СПД с номинальной (проектной) нагрузкой дает результаты, отличающиеся от результатов имитационного моделирования на 5-10%, и вполне может быть использован на ранних стадиях проектирования для быстрой оценки качества и эффективности функционирования разрабатываемых вариантов СПД. Для более точной оценки «поведения» сети при превышении номинальной нагрузки могут быть использованы средства подсистемы ОКЭФ.

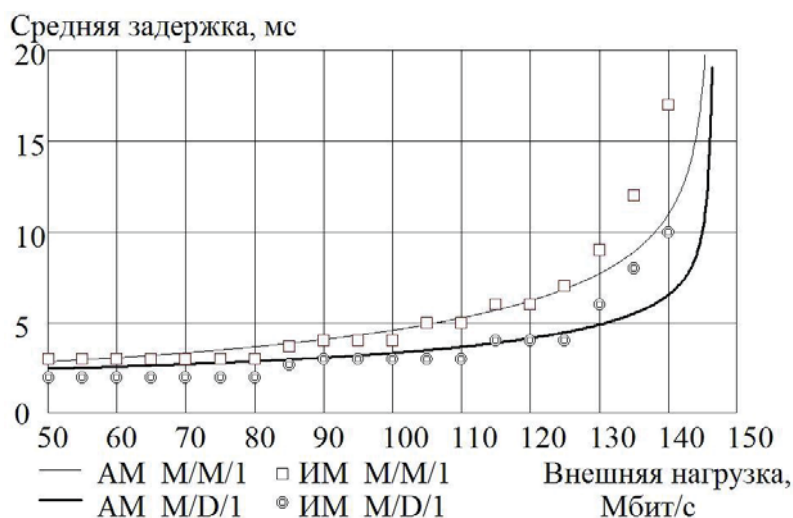


Рис. 3. Средняя задержка пакетов по результатам аналитического (АМ) и имитационного (ИМ) моделирования

Выводы

Комбинированный подход к моделированию позволяет в рамках единого процесса проектирования СПД использовать преимущества аналитических (на этапах формирования и корректировки проекта) и имитационных (на этапе оценки качества и эффективности полученного проекта) моделей. Наряду с непосредственным применением в процессе проектирования СПД, данный подход может быть использован для обоснования и верификации разрабатываемых аналитических моделей. Примером такого использования является проведенное экспериментальное обоснование эвристического способа оценки задержек пакетов в СПД.

Литература

1. Инфокоммуникационные сети. Том 1: Инфокоммуникационные сети: классификация, структура, архитектура, жизненный цикл, технологии / С.П. Воробьев, А.Е. Давыдов, В.В. Ефимов, В.И. Курносков – СПб.: Научное издание, 2019. – 739 с.
2. **Gostev V.** The Program System for Design Optimization of Data Transmission Networks // Mesh Methods for Boundary-Value Problems and Applications: 13th International Conference, Kazan, Russia, October 20-25, 2020 (Lecture Notes in Computational Science and Engineering, 141) 1st ed. 2022 Edition – pp.173-183.
3. **Гостев В.М.** Комплексное моделирование сетей передачи данных на базе системы оптимизации проектирования СПД // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 3(41). С. 77-81.
4. **Девятков В.В., Девятков Т.В., Федотов М.В.** Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 283 с.
5. **Девятков В.В., Девятков Т.В., Федотов М.В., Хайбуллин Ш.Д.** Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ GPSS World Core 2022660098, 25.05.2022. Заявка № 202619474 от 30.05.2022.
6. **Гостев В.М., Федотов М.В., Девятков Т.В.** Сервер удаленного моделирования платформы ALINA GPSS // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): Труды 11-й Всеросс. науч.-практич. конф. (Казань, 18 – 20 октября 2023 г.). – Казань: Изд-во АН РТ, 2023. С. 240-245.
7. **Price M.** C# 13 and .NET 9 – Modern Cross-Platform Development Fundamentals. – Packt Publishing, 2024.
8. **Клири С.** Конкурентность в C#. Асинхронное, параллельное и многопоточное программирование. – СПб.: Питер, 2020. – 272 с.
9. **Avalonia documentation.** – URL: <https://docs.avaloniaui.net/> (дата обращения: 27.09.2025).
10. **GMap.NET.** – URL: <https://github.com/judero01col/GMap.NET> (дата обращения: 27.09.2025).
11. **Гостев В.М., Хабибуллин Р.Ф.** О некоторых моделях и методах оценки временных характеристик сетей передачи данных территориальных компьютерных сетей // Исследования по информатике. Вып. 2. – Казань: Отечество, 2000. С.133-142.
12. **Клейнрок Л.** Вычислительные системы с очередями. – М.: Мир, 1979. – 600 с.