

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

*На правах рукописи*

Американов Александр Александрович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫСОКОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
СЕТЕЙ НА КРИСТАЛЛЕ**

**Резюме**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Романов Александр Юрьевич

Москва – 2022

## **Актуальность темы**

В связи с постоянным ростом сложности решаемых задач и увеличением объема обрабатываемой информации, а также с целью уменьшения времени обработки информации, требования к производительности вычислительных систем постоянно растут. Однопроцессорные системы не всегда могут справиться с задачами, требующими высокой вычислительной производительности, и являются неэффективными при работе с большими потоками данных. Повышение производительности вычислительных систем путем увеличения плотности транзисторов больше невозможно, что привело к эволюции вычислительных систем на основе многоядерности и многопоточности, а также использованию специализированных вычислительных ядер и ускорителей вычислений. Ярким примером экстенсивного увеличения количества ядер на одном чипе является чип WSE2 от компании Cerebras. Данный чип выполнен по 7 нанометровому техпроцессу и состоит из 850000 вычислительных узлов. Также существует тенденция к замене громоздкой CISC архитектуры на сети из процессорных ядер RISC-архитектуры. Из этого следует повышение требований к подсистеме связи для объединения множества гетерогенных ядер в одну систему – сеть на кристалле (СтнК).

Процесс проектирования СтнК можно разделить на несколько основных последовательных этапов: составление технического задания, предварительное проектирование, высокоуровневое (в/у) моделирование, низкоуровневое (н/у) моделирование, прототипирование или косимуляция, производство. На каждом этапе проектирования принято использовать различные САПР. При этом САПР могут использоваться для всего процесса проектирования в целом или для проведенного отдельного этапа разработки.

Этап в/у моделирования позволяет отобрать ограниченное количество подходящих для дальнейшего проектирования наборов параметров и

характеристик сети, заданных на стадиях составления технического задания и проектирования СтнК. Ошибки на этапе в/у моделирования являются дорогостоящими, т.к. н/у моделирование представляет собой гораздо более длительный и трудоемкий процесс. Например, в/у моделирование сети на 100 узлов с помощью в/у модели OCNS (On-Chip Network Simulator) может занимать несколько минут, в то время как н/у моделирование той же сети в ModelSim – несколько дней.

Обычно на этапе в/у моделирования применяются имитационные модели. Имитационная модель СтнК – это модель, в которой описаны основные моделируемые элементы сети и заданы правила взаимодействия между ними. Как правило, в/у модели используются для описания процесса передачи данных в СтнК и получения предварительных оценок ее характеристик при заданных параметрах. *Процесс передачи данных* является критически важным элементом функционирования сети. На этапе в/у моделирования точностью представления некоторых аспектов функционирования сети можно пренебречь, увеличив скорость расчета характеристик.

Следует также отметить, что различные в/у модели решают разные, зачастую узкоспециализированные, задачи; существует множество различных средств автоматизации моделирования СтнК и других вспомогательных средств, созданных разными разработчиками.

В практике проектирования нет единого универсального подхода, объединяющего различные подходы в реализации систем автоматизации проектирования СтнК на уровне архитектуры, который бы позволил реализовать принцип сквозного проектирования СтнК, где на разных этапах разработки применялись бы различные модели и средства автоматизации проектирования, и при этом была обеспечена их совместимость за счет универсальных интерфейсов и представления данных. Также стоит отметить, что передача данных между этапами в/у и н/у моделирования в основном выполняется вручную, что приводит к увеличению трудозатрат и ошибок.

Таким образом, разработка точных и высокопроизводительных в/у моделей СтнК, а также единых средств обработки результатов их работы и автоматизации процесса в/у моделирования являются важной и актуальной научно-практической задачей.

### **Степень разработанности темы**

Значительный вклад в развитие в/у моделирования сделали такие известные зарубежные научные коллективы и ученые, как: A. Colaso, P. Fidalgo, J. Gregorio, L. Menezo, P. Prieto, V. Puente (разработчики модели TOPAZ); M. Jones (разработчик модели NoCsim); M. Ahmed, M.M. Akbar, A. Al-Nayeem, H. Hossain, T.Z. Islam (разработчики модели gpNoCsim); и др. Из русских коллективов, работающих над проблемой в/у моделирования, можно выделить: Д.М. Альфонсо, Н.М. Мячина, А.Ю. Романова, А.М. Сухова, (разработчиков модели NewXim), а также А.Ю. Романов является разработчиком модели UOCNS. В области проектирования СтнК также работают: С.О. Быков, А.Д. Иванников, А.С. Кожин, Е.С. Кожин, Е. Короткий, А.Н. Лысенко, О.Г. Монахов, Э.А. Монахова, Ю.А. Недбайло, А.Л. Переверзев, Е.В. Примаков, Ю.В. Савченко, Е.А. Суворова, С.Р. Тумковский, В.Г. Хорошевский, Д.И. Шпагилев.

Из зарубежных коллег, работающих в области проектирования СтнК, можно выделить: N. Bagherzadeh, L. Benini, D. Bertozzi, S. Chattopadhyay, M. Daneshlab, G. De Micheli, M. Ebrahimi, A. Ganguly, K. Goossens, H.X. Gu, A. Jantsch, P. Liljeberg, W.C. Liu, A. Louri, Z.H. Lu, T. Mak, R. Marculescu, S. Murali, M. Palesi, P.P. Pande, S. Pasricha, J. Plosila, H. Sarbazi-azad, H. Tenhunen, K. Wang, N. Wu, J. Xu, L. Yang, M. Yang, Y.T. Yang, L. Zhang.

Анализируя степень разработанности темы данного исследования необходимо отметить, что в настоящее время существует множество в/у моделей, предлагаемых к практическому использованию для моделирования СтнК. Автором работы исследовано более 100 различных реализаций в/у моделей, которые могут применяться для СтнК. Они отличаются по

функциональному назначению, языкам разработки, модифицируемости, поддерживаемым топологиям СтнК, методам коммутации пакетов данных, архитектурам маршрутизаторов, типам трафика, поддерживаемым алгоритмам маршрутизации, алгоритмам арбитража трафика, областями применения результатов моделирования и еще множеству параметров. В настоящее время кажущееся многообразие не привело к появлению какой-либо универсальной модели, которая поддерживала бы все виды характеристик СтнК и выполняла бы их расчет. Обычно модель подбирается в зависимости от технических требований и решений, принятых на этапе проектирования. При этом большинство средств моделирования СтнК не имеют каких-либо встроенных инструментов автоматизации расчетов (например, возможности запуска нескольких моделей одновременно или автоматического подбора параметров в зависимости от целей моделирования).

Из вышесказанного следует необходимость в создании новых инструментов и методов автоматизации в/у моделирования СтнК, а также создания единых средств САПР для проведения исследования характеристик и проектирования СтнК. Т.е. существует потребность в создании САПР, которая имела бы возможность объединять несколько в/у моделей и позволяла сравнивать результаты их работы, тем самым увеличивая точность моделирования. Также объединение множества в/у моделей в единой САПР позволит сократить время моделирования путем применения различных методов оптимизации при поиске различных параметров СтнК.

Таким образом, **проблема**, решаемая в данном диссертационном исследовании, заключается в существовании множества разнородных в/у моделей СтнК и отсутствии САПР, которая позволила бы объединить их в рамках единой среды проектирования, проводить оценку достоверности результатов, а также сохранять результаты предыдущих циклов моделирования. Это определяет объект и предмет исследования:

**Объектом исследования** является процесс автоматизированного проектирования СтнК.

**Предметом исследования** является в/у моделирование СтнК.

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является повышение точности, скорости получения и воспроизводимости результатов в/у моделирования за счет объединения различных в/у моделей передачи данных в СтнК в единой САПР, путем разработки средств автоматизации и анализа результатов в/у моделирования СтнК.

Цель достигается последовательным решением следующих логически увязанных задач:

- Анализ классического цикла проектирования СтнК, обоснование методики сквозного проектирования СтнК для согласования этапов в/у и н/у компьютерного моделирования;
- Разработка методики синтеза и модификации в/у имитационных компьютерных моделей, объединяющей их в единую САПР проектирования СтнК;
- Разработка новой архитектуры САПР, отличающейся от существующих применением методологии сквозного проектирования для передачи данных между в/у и н/у этапами компьютерного моделирования, наличием бесшовного интерфейса для работы с различными в/у моделями и системой поддержки принятия решений (СППР);
- Создание прикладного программного обеспечения, представляющего собой САПР, поддерживающую множественный запуск моделей, сравнение и унифицированную обработку результатов в/у моделирования;
- Разработка СППР на основе анализа влияния различных параметров СтнК на их итоговую производительность;
- Апробация и внедрение результатов исследования на примере решения задачи анализа влияния различных входных параметров моделирования на выходные характеристики СтнК.

## **Методология и методы исследования**

Диссертационное исследование базируется на методах имитационного моделирования, параллельных вычислений, Монте-Карло, бинарного поиска, структурного и объектно-ориентированного программирования, статистической обработки и компаративного анализа данных.

## **Личный вклад автора**

Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. На основе глубокого и всестороннего обзора и анализа предметной области, изучения источников литературы и особенностей процесса проектирования СтнК выявлена проблема в отсутствии САПР для в/у моделирования СтнК и методов оптимизации процесса моделирования для уменьшения временных затрат и увеличения точности моделирования.

Автором лично сформулированы объект исследования, выявлена проблема и раскрыт предмет исследования как описание средств для решения научной задачи автоматизации этапа в/у моделирования при проектировании СтнК.

Поставлена цель работы и определен логически увязанный комплекс задач для ее достижения, при решении которых автором лично получены новые научные результаты, имеющие важное научное и практическое значение для отрасли проектирования электроники.

Личный вклад автора также отражен в достаточном количестве публикаций в рецензируемых и индексируемых изданиях.

## **Основные результаты работы:**

1. На основе обзора источников литературы и анализа современного состояния проблемы автоматизации в/у моделирования СтнК сформулирована научная задача диссертационного исследования;
2. На основе проведенного обзора и анализа в/у моделей выделены общие характерные особенности моделей и разработана методика для обеспечения функционирования нескольких моделей в рамках одной САПР;

3. Разработана архитектура САПР, позволяющая объединить несколько моделей в рамках одной среды проектирования, применять методы оптимизации и автоматизации при поиске параметров СтнК, сохранять, обрабатывать и повторно использовать результаты моделирования;

4. На основе результатов моделирования СтнК с различными условиями выведены закономерности, с использованием которых СППР позволяет выбрать наилучший по комбинации параметров вариант запуска множества в/у моделей;

5. Проведенные исследования подтвердили достоверность полученных результатов и эффективность практического применения разработанной САПР;

6. Результаты диссертационного исследования апробированы на значимых всероссийских и международных конференциях, и нашли поддержку среди ученых и специалистов в области автоматизации проектирования и моделирования цифровых систем и сетей на кристалле.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается корректностью постановки задачи и применяемых методов исследования, согласованностью результатов экспериментов с применением современных и широко апробированных средств проектирования и математического моделирования.

Достоверность также подтверждается апробацией основных результатов работы на протяжении ряда лет на многих всероссийских и международных конференциях и публикациями в общедоступных рецензируемых изданиях, индексируемых в международных и отечественных базах цитирования WoS, Scopus и РИНЦ. Предлагаемые в диссертации новые результаты внедрены в учебный процесс МИЭМ НИУ ВШЭ, нашли применение в исследовательских проектах ЦФИ НИУ ВШЭ и в проектных работах МИЭМ НИУ ВШЭ, что подтверждается соответствующими актами:

- Акт о внедрении в учебный процесс департамента компьютерной инженерии Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Внедрение результатов диссертационной работы позволило использовать в учебной и научной деятельности студентов департамента компьютерной инженерии современные теоретические и практические разработки в области моделирования сетей на кристалле. Разработанная САПР используется для изучения студентами СтнК различных конфигураций и применения теоретических знаний в области теории графов в практике исследования и разработки алгоритмов маршрутизации для различных топологий;
- Акт об использовании результатов диссертации в проектной работе «Аппаратно-программный комплекс для обучения в режиме удаленного доступа к лабораторному оборудованию». Результаты диссертационной работы используются в части лабораторных работ, адаптированных для выполнения на оборудовании лаборатории САПР в удаленном режиме, что открывает новые возможности для изучения сетей на кристалле.
- Исследовательский проект ЦФИ НИУ ВШЭ «Синтез циркулянтных топологий для применения в сетях на кристалле», рег. № НИОКТР АААА-А18-118051690145-1, 01.02.2018–29.12.2018;
- Исследовательский проект ЦФИ НИУ ВШЭ «Моделирование сетей на кристалле с подсистемой связи на основе циркулянтных топологий», рег. № НИОКТР АААА-А19-119061490099-1, 01.02.2019–31.12.2019;
- Исследовательский проект ЦФИ НИУ ВШЭ «Разработка гибридной модели для проектирования и симуляции сетей на кристалле», рег. № НИОКТР АААА-А20-120070390136-2, 03.02.2020-31–31.12.2020;
- Исследовательский проект ЦФИ НИУ ВШЭ «Разработка алгоритмов маршрутизации в сетях на кристалле», рег. № НИОКТР 121051100322-4, 01.02.2021–31.12.2021.

**Научная новизна** исследования заключается в том, что разработаны:

1. Методика сквозного проектирования СтнК, отличающаяся от других автоматизированной передачей данных между в/у и н/у этапами моделирования и позволяющая сократить время передачи данных между этапами моделирования на 80 %;

2. Архитектура САПР, отличающаяся от других тем, что позволяет объединить в себе множество в/у моделей, осуществить их множественный запуск на основе многопоточности, а также выполнять анализ и унифицированную обработку результатов моделирования, за счет чего повысить скорость моделирования до 3 раз;

3. Впервые предложено использование комбинации методов дихотомии, Монте-Карло, восходящего увеличения точности и подобия для поиска параметров СтнК, что позволило сократить количество запусков моделирования до 8 раз;

4. Впервые разработана автоматизированная СППР, основанная на кластеризации данных и поддерживающая принятие многокритериальных решений на основе заданных пользователем параметров используемых моделей и ограничений для в/у моделирования СтнК.

### **Теоретическая значимость и практическая полезность**

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии теории автоматизации проектирования СтнК.

Практическая полезность заключается в том, что:

- Разработано программное обеспечение, позволяющее синтезировать задание для н/у моделирования на основе результатов в/у моделирования;
- Разработана методика добавления моделей в САПР в/у моделирования, что позволяет добавлять неограниченное количество новых моделей в САПР и расширять его функциональность. В рамках диссертации добавлено 6 в/у моделей, обеспечивающих исследование всех основных характеристик СтнК;
- Разработанное математическое обеспечения в составе САПР позволяет увеличить точность до 5 раз и повысить скорость моделирования до 6 раз.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика сквозного проектирования СтнК, обеспечивает двустороннее взаимодействие между в/у и н/у этапами моделирования СтнК через передачу данных между ними;
2. Методика синтеза и модификации в/у моделей, позволяет объединить их в единой САПР для в/у моделирования СтнК;
3. Разработанная САПР для в/у моделирования позволяет решить все задачи, возникающие на данном этапе проектирования СтнК, за счет возможности добавления и модификации новых моделей, их множественного запуска, анализа и унифицированной обработки результатов моделирования;
4. Автоматизированная СППР позволяет пользователю подбирать модели СтнК и методы оптимизации расчетов по критерию времени расчета и точности моделирования для решения задачи анализа влияния параметров СтнК на ее итоговые характеристики;
5. Разработанное математическое обеспечения в составе САПР для формализации процессов оценивания точности и времени моделирования.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

1. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), г. Москва, Россия, 9-11 июня 2022 г., доклад «Automation of NoC throughput search in high-level modeling»;
2. International Russian Automation Conference (RusAutoCon), г. Сочи, Россия, 5–11 сентября 2021 г., доклад «Universal On-Chip Network Simulator for Networks-on-Chip Development»;
3. Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)», г. Зеленоград, ИППМ РАН, 1 марта – 1 ноября 2021 г., доклад «Автоматизация высокоуровневого моделирования сетей на кристалле»;

4. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского, г. Москва, НИУ ВШЭ, 18–28 февраля 2019 г., доклад «Разработка алгоритма маршрутизации в циркулянтах третьего порядка»;

5. VII International Scientific and Practical Conference «Actual Problems of Systems and Software Engineering (APSSE-2021)», г. Москва, Россия, 12–14 ноября 2019 г., доклад «Modification of the BookSim simulator for modeling networks-on-chip based on two dimensional circulant topologies».

Результаты диссертационного исследования отражены в 12 работах, из них 7 работ проиндексированы в международных наукометрических базах (WoS, Scopus, IEEE Xplore).

#### **Список опубликованных статей, отражающих основные результаты диссертации**

Работы, опубликованные автором в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные системы цитирования Scopus и WoS:

1. Romanov, A.Yu. Development of routing algorithms in networks-on-chip based on two-dimensional optimal circulant topologies / A.Yu. Romanov, E.V. Lezhnev, A.Yu. Glukhikh, A.A. Amerikanov // Heliyon. – Elsevier, 2020. – Vol. 6. – No. 1. – P. e03183. (Q1 Scopus, WoS).

2. Amerikanov, A.A. Automation of NoC throughput search in high-level modeling / A.A. Amerikanov, A.S. Ponomarev, T.V. Tarzhanov // 2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – IEEE, 2022. – P. 1–5. (Scopus).

3. Amerikanov, A.A. Universal On-Chip Network Simulator for Networks-on-Chip Development / A.A. Amerikanov, A.S. Ponomarev // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2021. – P. 677–682. (Scopus).

4. Ryazanova, A.E. Development of multiprocessor system-on-chip based on soft processor cores schoolMIPS / A.E. Ryazanova, A.A. Amerikanov, E.V. Lezhnev // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1163. – No. 1. – P. 1–7. (Q4 Scopus).

5. Romanov, A.Yu. Modification of the BookSim simulator for modeling networks-on-chip based on two dimensional circulant topologies / A.Yu. Romanov, E.V. Lezhnev, A.A. Amerikanov // Proceedings of the 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering (APSSE). – Moscow: HSE University, 2019. – Vol. 2514. – Ch. 107. – P. 182–192. (Scopus).

6. Schegoleva, M.A. Routing in Networks on Chip with Multiplicative Circulant Topology / M.A. Schegoleva, A.Yu. Romanov, E.V. Lezhnev, A.A. Amerikanov // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1163. – No. 1. – P. 1–7. (Q4 Scopus).

7. Amerikanov, A.A. Analysis of Approaches for Synthesis of Networks-on-chip by Using Circulant Topologies / A.Yu. Romanov, A.A. Amerikanov, E.V. Leghnev // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 1050. – No. 1. – P. 1–12. (Q4 Scopus).

Публикации соискателя в других изданиях:

8. Американов, А.А. Автоматизация высокоуровневого моделирования сетей на кристалле / А.А. Американов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2021 (МЭС-2021). – Москва: ИППМ РАН, 2021. – № 1. – С. 39–45.

9. Федотова, А.А. Разработка гибридной модели сети на кристалле / А.А. Федотова, А.О. Завьялов, А.А. Американов // Системный администратор. – Москва: 2019. – № 07–08. – С. 110–114.

10. Сидоренко, М.В. Разработка алгоритма маршрутизации в циркулянтах третьего порядка / М.В. Сидоренко, А.А. Американов // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского. – Москва: НИУ ВШЭ, 2019. – С. 82–83.

11. Пономарев, А.С. Разработка единой среды для высокоуровневого моделирования сетей на кристалле / А.С. Пономарев, А.А. Американов //

Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского. – Москва: НИУ ВШЭ, 2021. – С. 74–75.

Свидетельства и патенты:

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021668288 «Универсальная среда для проведения высокоуровневого моделирования сетей на кристалле Universal High-Level Network-on-Chip Simulator (UHLNoCS)». Авторы: А.А. Американов, А.Ю. Романов, А.С. Пономарев; заявитель и правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (RU). – №2021667238; заявл. 01.11.21; опубл. 12.11.21, Реестр программ для ЭВМ.

**Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, заключения, списка использованных источников литературы и приложения с актами внедрения результатов исследования.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены данные об их апробации.

**Первая глава** посвящена обзору и анализу предметной области на основе изучения источников литературы и современного опыта проектирования СтнК. Проведен анализ классического цикла проектирования СтнК, который состоит из следующих этапов: составление технического задания, предварительное проектирование, в/у моделирование, н/у моделирование, прототипирование или косимуляция, этап производства.

Показано, что в/у моделирование является важным этапом проектирования СтнК (рис. 1). Цена ошибки на этом этапе очень высока,

поскольку приводит к дополнительному проведению н/у моделирования, которое на несколько порядков более затратно по времени, чем в/у моделирование.

Сформулирована постановка задачи научного исследования и представлены краткие выводы по главе.

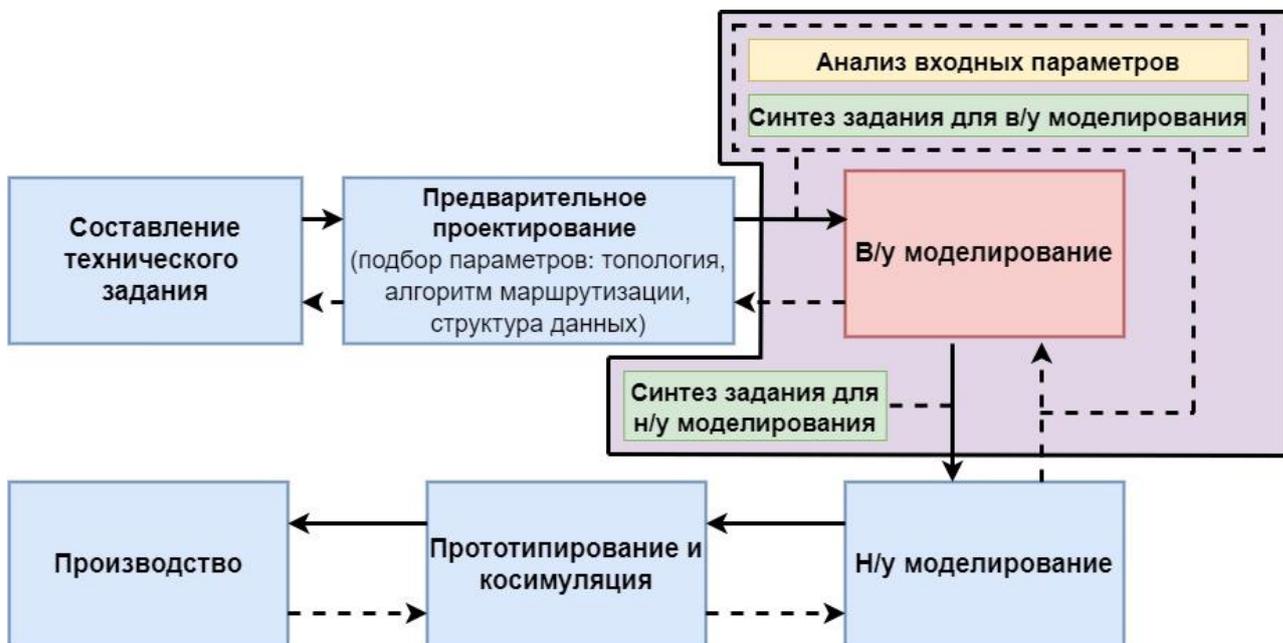


Рис. 1. Типовая схема проектирования СтК.

**Во второй главе** проведен обзор наиболее известных в/у моделей СтК, который показал, что существует большое количество различных решений и подходов к проведению, автоматизации и анализу результатов в/у моделирования СтК. Рассмотренные модели в основном поддерживают небольшое количество топологий, что ограничивает их применение для произвольных топологий. Из обзора следует, что из более 100 рассмотренных в/у моделей лишь 22 % поддерживают произвольные топологии. Это же касается и выходных характеристик моделей. Также стоит отметить, что произвольные алгоритмы маршрутизации пакетов в сети поддерживают лишь 8 % от рассмотренных моделей. Кроме таких существенных показателей, как топология и алгоритм маршрутизации, стоит также учитывать следующие параметры: метод коммутации, архитектура маршрутизаторов, алгоритм арбитража, которые тоже поддерживаются не всеми моделями. В связи с этим возникает необходимость в анализе и доработке существующих в/у моделей,

которые могли бы производить расчет всех наиболее значимых выходных характеристик для СтнК с произвольными топологиями.

Также из проведенного обзора следует, что модели в основном решают частные задачи, нет каких-то исчерпывающих и универсальных моделей, все они не стандартизированы и зачастую несовместимы друг с другом. Для того, чтобы провести моделирование СтнК с собственной комбинацией параметров топологии, типа маршрутизации, метода контроля и генерации трафика, арбитража и т.д., необходимо создавать собственную модель или дорабатывать существующую. При этом практически отсутствуют автоматизированные средства, которые бы облегчали анализ результатов моделирования и их верификацию, проведение множественного запуска модели с различными параметрами и т.д. Нет средств интеграции моделей между собой. Такое состояние проблемной области определяет необходимость разработки САПР, которая бы позволила решить обозначенные проблемы.

**Третья глава** посвящена разработке САПР для в/у моделирования СтнК. Предложена архитектура и формализован обобщенный алгоритм работы САПР, которая реализует разделение системы на блоки, посвященные стадиям синтеза и анализа, за счет чего позволяет объединить множество в/у имитационных моделей в рамках единой среды моделирования (рис. 2).

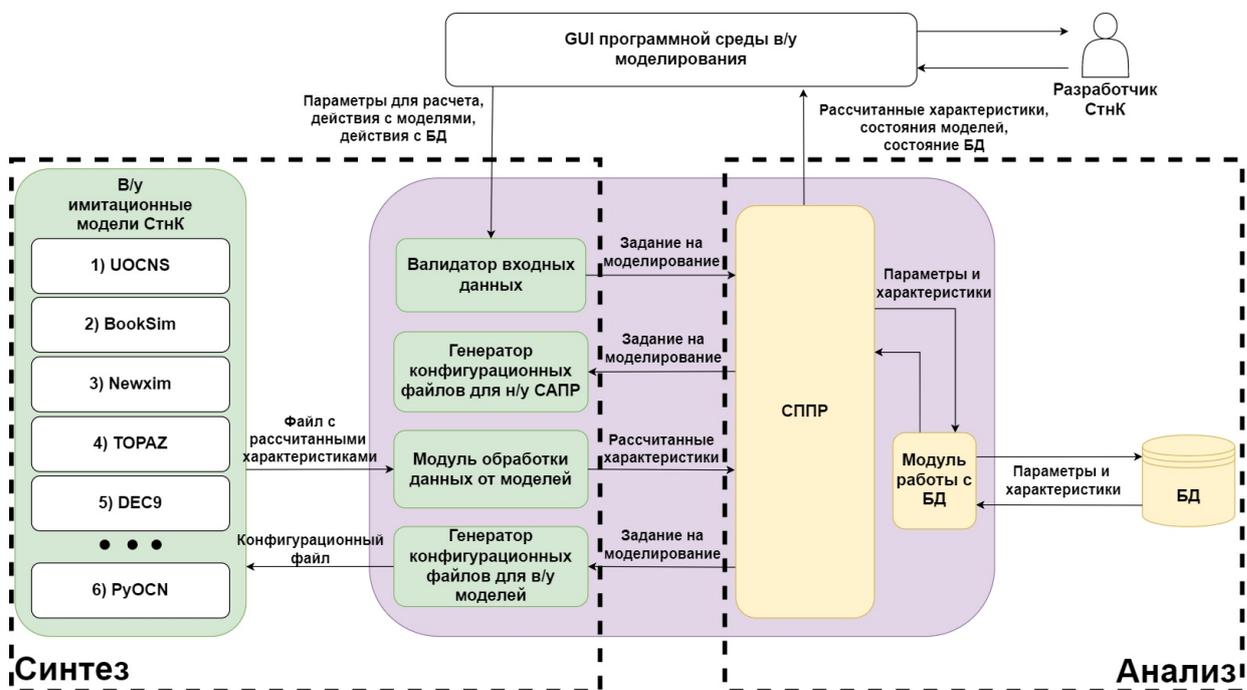


Рис. 2. Архитектура разработанной САПР.

Предложена методика добавления в/у моделей в САПР в/у моделирования, благодаря чему в созданную САПР было интегрировано 6 наиболее известных в/у моделей СтнК, которые покрыли все основные характеристики СтнК. При этом благодаря разработанной методике и модульной организации, САПР всегда может быть легко дополнена новыми моделями без потери ее функциональности и предыдущих результатов.

**Четвертая глава** посвящена реализации единой САПР, где одновременно могут исполняться несколько моделей. Создана единая система представления параметров моделей и результатов моделирования, открывшая возможность для применения различных методов автоматизации моделирования, обработки и интерпретации данных. С целью повышения точности и скорости моделирования было предложено использование следующих методов:

- Методов дихотомии и Монте-Карло, которые используются для уменьшения количества запусков модели, обеспечивая большую скорость приближения к нахождению точки перегиба на графике пропускной способности, с целью нахождения максимальной пропускной способности для конкретной конфигурации СтнК;

- Метода восходящего увеличения точности, который позволяет уменьшить время моделирования путем использования менее точных, но быстрых моделей для быстрого получения искомых значений в первичном приближении, которые потом могут быть уточнены с помощью более точной модели;
- Метода параллельного запуска нескольких моделей (распараллеливания вычислений), обеспечивающего одновременный запуск множества экземпляров одной модели с различными настройками или разных моделей;
- Метода подобия, позволяющего на основе сохраненных результатов предыдущих запусков моделей с другими параметрами, уменьшить диапазон поиска характеристик СтнК с новыми параметрами;
- Компараторного метода, с помощью которого происходит сравнение результатов работы разных моделей с одинаковыми начальными настройками, благодаря чему может быть обеспечен баланс между точностью и скоростью моделирования.

**Пятая глава** посвящена описанию модуля СППР, представляющего собой отдельный архитектурный блок и служащего для оценки задания пользователя. На выходе модуль СППР предлагает пользователю оптимальные комбинации моделей и методов оптимизации для ускорения расчетов и повышения их точности.

Также в главе приведены результаты апробации разработанной САПР для исследования различных конфигураций СтнК. Полученные данные демонстрируют, что интеграция моделей в САПР прошла успешно, и это не привело к снижению качества их работы. Также в главе приведены оценки выигрыша в точности и скорости моделирования за счет применения методов и средств автоматизации в/у моделирования, предложенных в 4 главе.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы и обозначены перспективные направления для продолжения дальнейших исследований.

Основным итогом диссертационной работы является решение важной и актуальной научно-прикладной задачи, связанной с увеличением скорости и повышением точности в/у моделирования СтнК путем разработки, специализированной САПР, содержащей в себе СППР, средства интеграции моделей, хранения и обработки результатов моделирования, а также автоматизации моделирования.