

На правах рукописи



**Мусаид Абдулфаттах Мохаммед Обеди**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ  
ТРАССИРОВКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ОСНОВЕ ОБЛАЧНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность: 05. 13. 12 – Системы автоматизации проектирования  
(промышленность)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре систем автоматизированного проектирования.

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент Лячек Юлий Теодосович, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования СПбГЭТУ «ЛЭТИ», (г. Санкт-Петербург).

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, Лузин Сергей Юрьевич, технический директор и руководитель обособленного подразделения САПР Санкт-Петербургского филиала ООО «Эремекс»; (г. Санкт-Петербург).

кандидат технических наук, Васильев Алексей Юрьевич, инженер – программист ООО НПФ «Беркут», (г. Санкт-Петербург).

**Ведущая организация :**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится «23» января 2018 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.02 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru).

Автореферат разослан «17» ноября 2017 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.02



/ Сафьянников Н.М./

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность исследования

Современная тенденция увеличения степени интеграции твердотельных микросхем, широкое распространение систем на кристалле (SoC) и повышение тактовых частот цифровой электроники до десятков гигагерц предъявляют повышенные требования к этапу проектирования топологии печатных плат радиоэлектронной аппаратуры. На этом этапе должны учитываться дополнительные эффекты, связанные с распространением электрических сигналов в плоских проводниках печатной платы такие, как паразитные емкостные и индуктивные связи, различное время распространения сигналов в проводниках разной длины (соствязания сигналов), волновое сопротивление проводников и т.д. Минимизация паразитных эффектов во многом определяется качеством выполнения **трассировки проводников печатной платы**. Таким образом, исследования и разработки, направленные на повышение эффективности систем автоматизированной трассировки являются актуальными и востребованными на рынке САПР.

В настоящее время лидерами по продажам САПР печатных плат (ПП) являются фирмы США – Mentor Graphics и Cadence, японская фирма Zuken, а также австралийская компания Altium. Mentor Graphics предоставляет для этих целей продукт Xpedition (Expedition), систему PADS, фирма Cadence систему проектирования Allegro Cadence, а австралийская компания Altium программные средства Altium Designer (ранее она поддерживала системы P-CAD и Protel, которые широко использовались, да и продолжают использоваться в Российской Федерации). Особо следует выделить систему топологической трассировки Topological Router (ТороR) отечественных разработчиков компании “Эремекс”. Эта система по договору с компания Altium в 2015 г. должна быть встроена в Altium Designer в качестве плагина. Стоимость лицензий на использование импортных систем достаточно высока и составляет от нескольких десятков до сотен тысяч долларов и, по мере их совершенствования, она будет только возрастать. Необходимо отметить, что алгоритмическое и программное обеспечение трассировки ПП является одной из основных составляющих этих САПР, определяющих их стоимость в настоящее время. Кроме того, для обеспечения трассировки многослойных печатных плат большой степени сложности (более нескольких сот компонентов при нескольких тысячах контактов и/или трасс) при использовании таких систем, как Spectra и Expedition, требуется высокопроизводительные серверные платформы, стоимость которых сопоставима со стоимостью программного обеспечения самих САПР. В этой связи приобретение современных САПР и их официальное использование доступно только для крупных корпоративных пользователей, широко практикующих разработку современной радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры. Другим же разработчикам, которые постоянно не занимаются проектированием ПП, покупка лицензий таких САПР оказывается экономически невыгодной.

Решение проблем проектирования ПП для таких пользователей может быть обеспечено на основе внедрения интернет-технологий в рамках двух подходов – разработки распределенных версий топологической САПР и предоставления аренды САПР в сети Интернет на основе облачных технологий.

Использование первого подхода предполагает реорганизацию (рефакторинг) архитектуры программного обеспечения САПР с разделением системы на два уровня: уровень проектирующих (обрабатывающих) подсистем, решающих задачи

автоматического размещения компонентов и автоматической трассировки, и уровень обслуживающих подсистем, обеспечивающий графический интерфейс и отображение топологии проектируемой ПП.

Программные модули обслуживающего уровня размещаются на рабочей станции пользователя (клиентская часть системы) и обеспечивают графический интерфейс с топологической САПР. Проектирующая подсистема САПР представляет серверную составляющую распределенной САПР и функционирует на веб-сервере в сети Интернет. Для синхронизации вызова подсистем и передачи проектных данных в состав распределенной топологической САПР необходимо включить управляющее веб-приложение.

Использование распределенной версии САПР позволит приобретать пользователю более дешевую облегченную лицензию только на обслуживающую подсистему САПР и оплачивать фактическое время использования проектирующей подсистемы в сети Интернет. Перенос проектирующей подсистемы в сеть Интернет позволит фирме-разработчику (вендору программного обеспечения) создавать централизованные Интернет-центры топологического проектирования (веб-дизайн-центры) на основе высокопроизводительного масштабируемого серверного оборудования с удаленным доступом.

Второй подход, основан на виртуализации аппаратных и программных ресурсов. При этом базовая САПР подвержена значительно меньшему количеству изменений. Основной проблемой при переносе топологических САПР в «облако» является доставка насыщенного графического «рабочего стола» с изображением топологии печатной платы на рабочую станцию пользователя. Решение этой проблемы во многом зависит от аппаратной платформы «облака» и в настоящее время находится в стадии проработки крупнейшими производителями серверных платформ и графических процессоров.

**Степень разработанности темы.** Значительный вклад в теорию автоматизированного проектирования ПП внесли российские ученые Базилевич Р.П., Лузин С.Ю., Полубасов О.Б., Лячек Ю.Т., Петросян Г.С., Бессонов, А.В., Лузин М.С., Дмитриев П.И., Лысенко А.А. и др.

Достижения этих ученых в значительной степени способствовали созданию научных основ, методологии и практической реализации технологии топологического проектирования, обеспечившие ведущее положение отечественной системы Topological Router среди существующих систем проектирования ПП, которые разработаны в других странах мира.

Данная работа продолжает развитие этих исследований и предназначена для обеспечения широкого доступа разработчиков радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры к наиболее эффективной системе проектирования ПП с использованием современных облачных технологий.

**Объектом исследования** диссертационной работы являются методы построения и применения систем топологической трассировки печатных плат на основе облачных технологий.

**Предметом исследования** является программное и информационное обеспечение систем топологической трассировки ПП, ориентированное на использование облачных вычислений.

#### **Цели и задачи исследования**

**Цель работы** – повышение эффективности трассировки печатных плат на основе системы, ориентированной на применение в сети Интернет.

**Основная задача диссертации** – исследование и разработка системы топологической трассировки печатных плат, построенной на основе облачных технологий, что предполагает решение следующих **подзадач**:

1) сравнительный анализ качества трассировки различными САПР на основе вычисления интегрального показателя глобального приоритета для различных систем и проведение экспериментального сравнения результатов трассировки печатных плат различной степени сложности в конкурирующих системах. На основе анализа результатов сравнения отобрать прототип системы для развертывания ее на облачной платформе в сети Интернет;

2) сравнение методов построения интернет-ориентированных программных комплексов на основе традиционных сетевых технологий и на основе облачных вычислений;

3) выбор платформы для развертывания облачной версии топологического трассировщика и реализация вычислительной среды для дистанционного доступа пользователей к САПР;

4) определение требований к организации информационного обеспечения топологической САПР, используемой в сети Интернет;

5) разработка моделей и структур данных для хранения проектов печатных плат, полученных в результате сеансов проектирования в среде облачной САПР.

#### **Основные методы исследования**

В ходе диссертационного исследования были использованы математические методы сравнительного анализа и метод анализа иерархий, методы теории САПР, методы построения распределенных автоматизированных систем. Экспериментальная разработка программного обеспечения САПР выполнялась на основе использования сервер Necs 3.Intel Xeon Q X5450A с 4 Гб оперативной памяти. Непосредственно на сервере было установлено программное обеспечение VMware ESXi 5.5. Установка VMware vSphere Client 5.5 на клиентской машине обеспечивает соединение с сервером, создание и управление виртуальными машинами (VM).

#### **Достоверность научных результатов**

Подтверждается использованием объективных критериев сравнения систем, определяющих конструктивные параметры топологии спроектированного изделия, основными положениями общей теории САПР, корректностью применяемого математического аппарата и результатами, полученными при тестировании созданной системы топологического проектирования на основе корпоративного облака.

#### **Новые научные результаты**

1. Выявлены основные критерии, характеризующие качество трассировки ПП и позволяющие на основе использования математического метода анализа иерархий Т. Саати ("Analytic hierarchy process") и сравнительных экспериментальных исследований объективно выбрать наиболее эффективную систему проектирования ПП для ее реализации в корпоративном облаке.

2. Предложена распределенная вэб-ориентированная архитектура системы топологического проектирования, позволяющая перенести процесс проектирования в Интернет-среду и сократить стоимость САПР для промышленных предприятий, разрабатывающих радиоэлектронную аппаратуру.

3. Предложена методика построения топологических САПР на основе корпоративного облака, которая обеспечивает использование САПР при ограниченном количестве лицензий.

4. Впервые выполнена реализация облачной платформы для эксплуатации САПР ToroR на основе среды VMware ESX Server. Проведены тестовые сеансы удаленного доступа к топологической САПР на основе клиента VMware vSphere Client 5.5.

5. Предложен новый вариант построения корпоративного облака САПР на основе платформы виртуализации в Windows Server 2012 Hyper-V. В данной среде создано облако виртуальных машин САПР с системой ToroR и сервером проектов. Проведено тестовое использование облачной ВМ ToroR в режиме удаленного доступа с рабочей станции САПР.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Система критериев на основе математического метода анализа иерархий Т. Саати, характеризующие качество трассировки ПП, и обоснование выбора системы проектирования ПП для использования в Интернет среде.

2. Распределенная веб-ориентированная архитектура системы топологического проектирования, позволяющая перенести процесс проектирования в Интернет-среду.

3. Методика построения топологических САПР на основе корпоративного облака, которая обеспечивает пользователям использование САПР при ограниченном количестве лицензий.

4. Модели данных и методика построения базы данных проектов, размещаемой на виртуальном сервере проектов в корпоративном облаке.

#### **Практическая ценность**

1. Разработанная универсальная распределенная архитектура веб-ориентированной автоматизированной системы топологического проектирования ПП, которая может служить основой для построения распределенных САПР объектов различной физической природы.

2. Применение в инженерной практике САПР, функционирующей в среде Интернет, дает относительно недорогой доступ к широким возможностям проектирования ПП на базе самой совершенной в настоящее время системы топологического проектирования, как в рамках сеанса проектирования, так и при последующем использовании полученных результатов в других разработках.

3. Методика построения топологических САПР на основе корпоративного облака может быть использована при развертывании облачных версий прикладных программных систем различного назначения.

4. На базе инвариантного ядра базы данных проектов возможно построение информационного обеспечения САПР в различных отраслях промышленности.

#### **Реализация и внедрение результатов**

На основе полученных результатов разработана веб-ориентированная система автоматизированного проектирования топологии ПП. Использование системы в инженерной практике позволяет обеспечить высококачественное проектирование РЭА и ЭВА при относительно небольших затратах на разработку как для индивидуальных проектировщиков, так и для корпоративных пользователей. Система, установленная в сети Интернет, обеспечивает как индивидуальную, так и коллективную работу над проектами, сохранение в архивах данных результатов

разработок и использование проектных данных для выпуска документов и подготовки технологических процессов производства печатных плат.

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении госбюджетной НИР, проводимой по тематическому плану СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по теме «Математико-логические основы построения сред виртуальных инструментов» (шифр САПР-49, 2012-2014 гг.).

Материалы, полученные в процессе исследования, и разработанная система САПР используется в учебном процессе кафедры САПР Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) для изучения процессов проектирования печатных плат, а также методики построения программного обеспечения распределенных систем автоматизированного проектирования при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Информатика и вычислительная техника».

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XVIII-ая (SCM'2015), XIX-ая (SCM'2016) и XX-ая (SCM'2017) международные конференции по мягким вычислениям и измерениям. – СПб.
- XXII-ая международная конференция «Современное образование: содержание, технологии, качество». – СПб.
- 67, 68, 69-ая научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

#### **Публикации**

Основное теоретическое и практическое содержание диссертации опубликовано в 17 научных трудах, из них по теме диссертации опубликовано 13 научных работ, среди которых 4 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК к опубликованию основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 3 публикации, индексируемые в международной базе данных SCOPUS, 6 работ в материалах международных и прочих конференций.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 67 наименований, и приложения. Работа изложена на 148 машинописных страницах, содержит 31 рисунок и 23 таблицы.

#### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели, задачи, объект и предмет исследования сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая ценность результатов, представлены результаты апробации работы, публикации, структура и объем диссертации

**В первой главе** дается обзор широко используемых систем проектирования печатных плат, определяются функции, которые должны обеспечивать эти системы, выявляются лидеры на рынке САПР ПП и исследуются основные возможности и особенности, предоставляемые этими системами проектировщикам.

Большое разнообразие имеющихся программных продуктов выбор программного обеспечения, обеспечивающего эффективное проектирование ПП, достаточно сложная задача, которая определяется в первую очередь техническими

возможностями и особенностями соответствующего продукта, а также финансовыми затратами на покупку соответствующих лицензий и обучение персонала. В этой связи на начальном этапе выбора программного продукта для создания ВЭБ-ориентированной системы проектирования ПП была определена группа наиболее широко используемых в мире и России САПР электронных схем, а именно, PADS, Expedition, Altium Designer, NanoBoard, Alegro PCB Router, Topological Router (TopoR).

Наилучшим образом преимущества одной системы трассировки ПП над другими проявляются при сравнении по тем критериям, которые определяют конструктивные параметры топологии спроектированного изделия и непосредственно зависят от эффективности и качества используемых в каждой системе процедур автоматического синтеза топологии.

В диссертации в качестве таких объективных критериев предложено использовать следующие девять критериев: число переходных отверстий, суммарную длину проводников, процент неразведенных трасс, число нарушений

Таблица 1 – Таблица глобальных приоритетов рассматриваемых систем

*) Сравнимая система	Критерии									Глобальные приоритеты
	Процент неразведенных трасс	Число нарушений проектных норм	Суммарная длина соединений	Число переходных отверстий	Уровень перекрестных электромагнитн. помех	Время разводки	Возможность переназначения функционально эквивалентных контактов	Наличие средств автоматического размещения	Удобство пользования	
	Нормализованное численное значение вектора приоритета									
	0,3007	0,2181	0,1532	0,1058	0,0725	0,0642	0,0479	0,0241	0,0135	
<b>1</b>	0,0819	0,2287	0,1427	0,1362	0,1501	0,1139	0,2381	0,0575	0,0714	<b>0,1427</b>
<b>2</b>	0,0713	0,2287	0,1081	0,0828	0,0922	0,1026	0,2381	0,0575	0,0968	<b>0,1239</b>
<b>3</b>	0,0620	0,2287	0,0819	0,0851	0,0375	0,0677	0,2381	0,4546	0,0698	<b>0,1205</b>
<b>4</b>	0,6705	0,0716	0,6239	0,6455	0,6399	0,6675	0,0476	0,3776	0,6699	<b>0,4908</b>
<b>5</b>	0,1144	0,2423	0,0434	0,0531	0,0803	0,0484	0,2381	0,0529	0,0920	<b>0,1224</b>

\*) Сравнимые системы: 1 – Expedition PCB, 2 – PADS, 3 – SPECCTRA, 4 – TopoR, 5 – Altium Designer.

проектных норм, уровень перекрестных электромагнитных помех, время разводки, наличие средств автоматического размещения компонентов схемы на плате, возможность переназначения функционально эквивалентных контактов микросхем и удобство пользования системой.



Представленные факторы относительно разнообразны и неоднородны. Они вносят неоднозначный вклад в общий процесс проектирования ПП и трудно поддаются комплексной оценки, позволяющей достаточно объективно выбрать ту или иную систему САПР.

В настоящем исследовании для выбора наиболее эффективной системы проектирования ПП было предложено использовать процедуру принятия решения "Analytic hierarchy process", разработанную американским математиком Т.Саати вначале 1970 г. и названную в России методом анализа иерархий (МАИ). В методе предполагается сравнение двух элементов на основе некоторой шкалы предпочтений, выражаемой в баллах от 1 до 9 (от уровня равнозначности вклада критерия в достижение соответствующей цели – 1 балл, до абсолютного предпочтения первого критерия перед вторым – 9 баллов).

При этом в диссертационной работе вначале в виде соответствующих матриц рассчитываются таблица результатов сравнения между собой используемых критериев и таблицы, в которых определяются вектора приоритетов сравниваемых систем по каждому из используемых критериев. После этого на основе ранее полученных значений в указанных матрицах формируется таблица глобальных приоритетов анализируемых систем (табл.1).

В итоге в соответствии с рассчитанными значениями глобального приоритета анализируемые системы (см. табл.1) распределись в следующем порядке предпочтения использования для проектирования ПП РЭА и ЭВА:

1)ТороR (глобальный приоритет равен 0,4908– наиболее предпочтительная система проектирования ПП); 2) Expedition PCB (0,1427); 3) PADS (0,1239); 4) Altium Designer (0,1224); 5) SPECCTRA (0,1205)–наименее предпочтительная система).

**Во второй главе** автором решалась задача проверки полученных методом МАИ теоретических результатов сравнения систем практическими экспериментами. Сравнение выполнялось на примерах разводки ПП, выполненных с использованием импортных систем и трассировщиком ТороR. При этом в качестве входной информация для системы ТороR использовались описания исходных плат с сайта Eremex.com. Эти платы были ранее разведены в различных системах. Исходные примеры отличаются достаточно большим разнообразием по типу и конструкторским особенностям используемых в них компонентов схем (аналоговые и цифровые, штырьковые, планарные и BGA элементы), по технологическим требованиям, частоте работы, сложности и т.д. Полная перетрассировка исследуемых исходных плат осуществлялась в системе ТороR. При этом для корректности получаемых результатов трассировки ПП в системе ТороR по сравнению с исходной трассировкой в других САПР, все используемые технологические ограничения, а также ширина прокладываемых трасс и размеры переходных отверстий использовались точно такими же, как и в исходных системах автоматического проектирования. Кроме того, расположение всех компонентов на плате оставлялось без изменения, кроме случаев, при которых в системе ТороR выполнялось автоматическое размещение электронных компонентов для обеспечения минимальной суммарной длины проводников..

Результаты сравнения трассировки плат небольшой сложности приведены в табл. 2, а большой сложности – в табл. 3. В табл. 4 приведены результаты анализа перекрестных помех в платах большой сложности по результатам экспресс

анализа, выполненном с использованием программы Hyper Lynxv 8.1.1, которая входит составной частью в программное систем Expedition и PADs

Таблица 2 – Результаты сравнительной трассировки схем небольшого размера

№ п/п	Схема (файл)	Система	Кол-во слоев	Общая длина соединений		Кол-во дополнительных переходов		Число неразведенных соединений
				мм	% уменьшения	Кол-во	Величина снижения	
1	arz3	Expedition	4	10359,5		283		6 нарушений
		ТopoR	2	8758,4	18,2	247	14,5%	без нарушений
2	ADP	Specetra	2	7338,9		145		84 нарушения
		ТopoR	2	5632,8	30,3	58	в 2,5 раза меньше	без нарушений
3	LP2	P-CAD	2	4970,5		138		без нарушений
		ТopoR	2	4402,6	12,9	1	в 138 раз меньше	без нарушений
		ТopoR с авторазмещением	2	3338,8	48,8	0	без переходов	без нарушений
4	Z80_routed	Altium Desiner	2	7749,2 <sup>*)</sup>		20		2 цепи не разведены
		ТopoR	2	6792,9	14,1	0	без переходов	без нарушений

Таблица 3 – Результаты трассировки плат больших схем в соответствующих системах

№ п/п	Схема (файл)	Система	Длина соединений		Дополнительные Переходы		Число неразведенных соединений
			мм	% превышения	кол-во	% Превышения	
1	Bench36	Expedition	82880	11,5	3137	35	0
		PADs	92176	24	3525	52	0
		Specetra	95864	29	3889	67	19 плюс 21 конфликт
		ТopoR	74319	0	2324	0	0
2	Board3_4L	Expedition	57272	31	1472	34	0
		PADs	50935	16	1627	48	0
		Specetra	55385	26,5	1575	43	0
		ТopoR	43768	0	1098	0	0
3	Board3_2L	Expedition	57187	11 <sup>*)</sup>	1864	41 <sup>*)</sup>	3
		PADs	55596	14,5 <sup>*)</sup>	3325	151 <sup>*)</sup>	4
		Specetra	60076	24	2247	70	0
		ТopoR	48557	0	1323	0	0

<sup>\*)</sup> – без учета неразведенных соединений

Таблица 4 – Результаты выявленного уровня перекрестных электромагнитных помех в платах, спроектированных в соответствующих системах

№ п/п	Схема (файл)	Система	Сумма максимального сигнала, наводимая от двух цепей, мВ	Число цепей с помехой более 100 мВ	Число цепей с помехой более 150 мВ	Число цепей с помехой более 300 мВ
1	Bench36	Expedition	1442	400	255	172
		PADs	1502	371	318	151
		Specctra	-	-	-	-
		TopoR	566	29	22	14
2	Board3_4L	Expedition	1912	177	126	80
		PADs 1	1977	241	180	121
		Specctra	1718	400	262	193
		TopoR	174	8	2	0
3	Board3_2L	Expedition	1783	145	88	43
		PADs	2776	159	107	54
		Specctra	1617	301	257	185
		TopoR	356	14	12	4

Приведенные примеры убедительно свидетельствуют, что система TopoR по сравнению с зарубежными системами обеспечивает существенно меньшую общую длину соединений при значительно меньшем числе дополнительно устанавливаемых переходных отверстий (меньше на 30 – 70 процентов) при безусловной автоматической разводке всех трасс. Эти цифры указывают на то, что плотность проложенных трасс на платах оказывается существенно ниже, а, следовательно, уровень перекрестных электромагнитных помех в таких платах должен быть ниже, чем в ПП, спроектированных с помощью других систем трассировки. Уровень помех еще более понижается, так как топологический трассировщик практически не создает параллельных проводников и эти проводники не имеют изломов, а изгибаются плавно по соответствующим дугам. В существенном снижении перекрестных помех можно убедиться

Видно, что уровень максимальной помехи в платах, трассировка которых выполнялась в топологической системе проектирования TopoR значительно ниже (от 2,5 до 10 раз). Кроме того, существенно ниже число цепей, в которых помеха превышает задаваемое пороговое значение (100, 150 или 300 мВ).

**В третьей главе** предложены методы построения интернет-ориентированных систем топологического проектирования печатных плат. Отмечено, что современная тенденция развития топологических САПР, повышающая эффективность их применения, предполагает использование более совершенных автоматических трассировщиков, которые на 90-95% корректно разводят многослойные печатные платы с высокой плотностью компонентов.

Вторым направлением совершенствования топологических систем является повышение эффективности их использования и сокращение стоимости владения на промышленных предприятиях, разрабатывающих радиоэлектронную аппаратуру. В

рамках данного направления наибольший эффект достигается за счет переноса процесса проектирования в среду Интернет. При этом одним из возможных решений данной проблемы является построение распределенных веб-ориентированных версий САПР с облегченным режимом лицензирования.

В качестве прототипа для создания web-ориентированной версии распределенной топологической САПР в диссертации предлагается использовать интегрированную систему Altium Designer, которая предназначена для сквозного проектирования аналоговых, цифро-аналоговых и аналогово-цифровых устройств. Составной частью системы Altium Designer, отвечающей за проектирование печатной платы радиоэлектронного устройства, является последняя версия широко-распространенного в РФ пакета программ P-CAD. На основе анализа структуры пакета P-CAD в диссертации предложена распределенная архитектура интернет-ориентированной версии подсистемы проектирования ПП, которая состоит из серверной и клиентской составляющих. Особенностью предложенной архитектуры является распределение проектных процедур между серверной и клиентской частями САПР следующим образом.

Клиентская часть: графический ввод принципиальной схемы устройства; создание конструктива печатной платы; первоначальное размещение элементов на плате; интерактивная трассировка печатной платы; создание и редактирование графических примитивов схемных элементов.

Серверная часть: автоматическая трассировка печатной платы; моделирование и анализ характеристик принципиальной схемы устройства; анализ распространения сигналов в печатной плате; формирование конструкторской документации; вспомогательные операции по преобразованию проектных данных.

Для управления процессом автоматизированного проектирования в состав распределенной САПР включены управляющие web-приложения клиента и сервера. Необходимость в использовании проектных данных на стороне клиента и на стороне сервера обуславливает наличие в составе САПР диспетчера проектных данных. В функции диспетчера входит пересылка экземпляров проектных файлов между клиентом и сервером и синхронизация рабочих версии файлов.

Анализ предложенной архитектуры распределенной САПР позволяет сделать следующие выводы: перенос конструкторской САПР в среду Интернет требует значительной переработки исходной архитектуры и ее усложнения; требуется разработка дополнительных web-приложений на стороне клиента и сервера для обеспечения управления распределенным процессом проектирования; необходима процедура дублирования и синхронизации проектных данных на стороне клиента и на стороне сервера.

Таким образом, создание web-ориентированной версии САПР требует значительных трудозатрат по рефакторингу архитектуры системы и реализации управляющих web-приложений. Работы в данном направлении могут вести вендорные фирмы, владеющие правами на программное обеспечение.

Альтернативным методом переноса топологической САПР в сеть Интернет является подход на основе облачных технологий. Достоинством данного направления работ является возможность использования САПР-прототипа без каких либо изменений в архитектуре и коде программного обеспечения. Основной объем работ в рамках облачных технологий приходится на развертывание инфраструктуры облака и создании виртуальных машин носителей САПР. В

качестве исходной системы для построения облачной САПР в диссертации выбран топологический трассировщик “Topological Router” (“TopoR”) компании “Эремекс” (см. главу 1 и 2 диссертации).

Высокая стоимость лицензий на использование САПР в проектной деятельности (от нескольких десятков до сотен тысяч долларов) делает экономически невыгодным приобретение и установку систем EDA на каждом рабочем месте. Решением данной проблемы является развертывание на предприятии корпоративной облачной среды и перенос в облако имеющихся в распоряжении предприятия систем EDA с возможностью организации коллективного доступа к облачным сервисам. При таком подходе можно ограничиться минимально необходимым количеством лицензий, кроме того некоторые фирмы предлагают облегченный режим лицензирования в случае использования САПР в облаке.

В диссертации показано, что для предприятия, обладающего ограниченным количеством лицензий на систему топологического проектирования, наиболее оптимальным будет использование *корпоративного облака САПР*. В этом случае, предприятие, эксплуатирующее САПР, самостоятельно развертывает облако на одной из инструментальных платформ и создает инфраструктуру для САПР в корпоративной сети или в сети Интернет. Все работы по поддержанию и эксплуатации облака выполняют IT-специалисты предприятия или приглашенные исполнители. С целью выбора платформы для построения корпоративного облака в диссертации были развернуты два тестовых варианта виртуальной вычислительной среды: на основе технологий VMware и на базе решений компании Microsoft.

В первом варианте в качестве инструмента виртуализации при построении корпоративного облака САПР был использован VMware ESX Server, который является встроенным гипервизором и работает непосредственно на платформе серверов, не требуя дополнительной операционной системы. Для управления виртуальными машинами используется клиент VMware vSphere, который устанавливается на клиентском компьютере. С помощью клиента vSphere можно открывать консоль на рабочем столе управляемых виртуальных машин. С консоли можно изменять настройки операционной системы, запускать приложения, просматривать файловую систему, контролировать производительность системы и т.п., как если бы работа выполнялась с физической системой. Можно также использовать копии текущего состояния всей виртуальной машины. Чтобы работать только с виртуальными машинами и физическими ресурсами сервера ESX/ESXi, необходимо подключить клиент vSphere непосредственно к этому серверу. Для управления физическими ресурсами нескольких серверов необходимо использовать сервер vCenter.

Тестирование корпоративного облака на основе платформы VMware показало возможность использования облачных технологий для организации режимов коллективного использования топологической САПР. Для развертывания полнофункционального варианта корпоративного облака и обеспечения режима доступа к виртуальной машине САПР через web-интерфейс необходима установка дополнительного сервера VMware vCenter Server 5.5.

Второй вариант создания корпоративного облака САПР в диссертации выполнен на основе технологий фирмы *Microsoft*. Решение может быть создано на платформе Windows Server с поддержкой системы удостоверений Windows Server

Active Directory, виртуализации Hyper-V и глубокого анализа приложений с помощью System Center. Сформировав корпоративное облако на основе Windows Server, Hyper-V и System Center, организация получает преимущества комплексного подхода Microsoft при внедрении облачных вычислений и изменении способа предоставления ИТ-услуг производственному процессу. При тестировании платформы на основе гипервизора Hyper-V было создано 3 виртуальные машины САПР **ТороR1, ТороR2, ТороR3**.

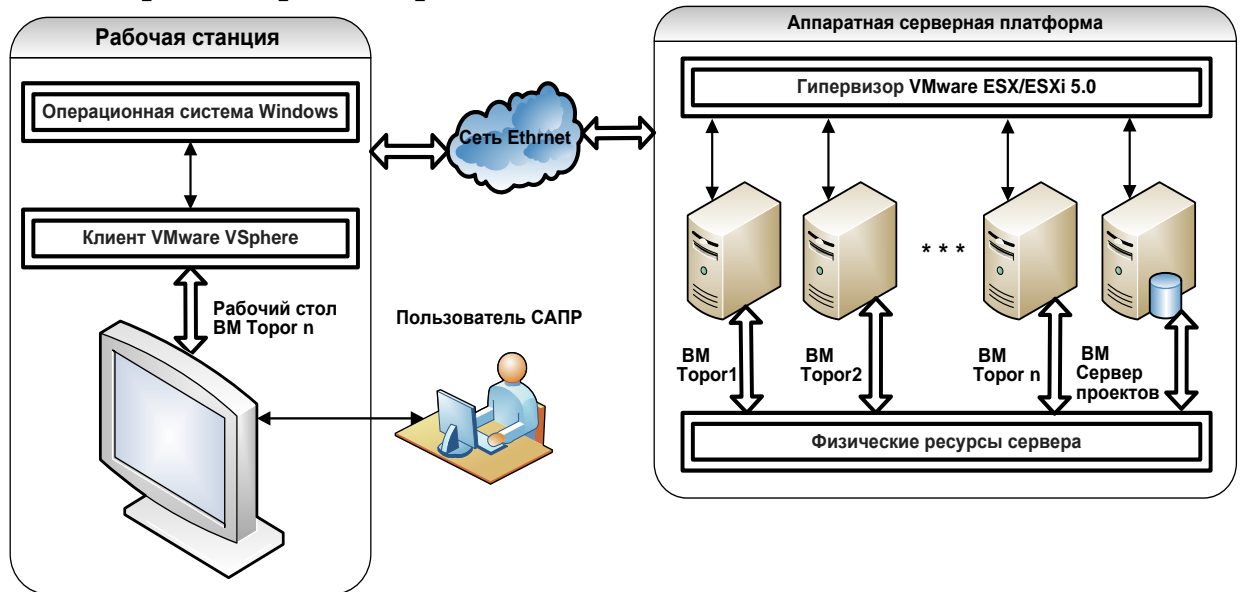


Рисунок 1. Архитектура платформы для развертывания САПР “ТороR”

В качестве гостевых операционных систем на VM САПР была установлена Windows7 Prof 32-bit. На каждой VM САПР инсталлирована версия системы ТороR Lite. Доступ извне к VM САПР обеспечивается настройками виртуального сетевого коммутатора, который имеет статус внешнего. Для хранения проектных данных в облаке на серверном хосте была создана VM **Server\_projects** с гостевой операционной системой Windows Server 2008 R2. На ней была проведена инсталляция СУБД MSSQL-Server 2008.

Для организации доступа к VM *ToroRi* на *рабочей станции САПР* был использован протокол удаленного рабочего стола **RDP (Remote Desktop Protocol)**, который поддерживает подключение к виртуальным машинам, развернутым в среде гипервизора *Hyper-V*. Необходимым условием подключения является получение VM *ToroRi* внешнего IP-адреса из той же сети, к которой подключена рабочая станция САПР. Протокол **RDP** реализован в рамках соответствующего клиента (**RDC**).

Проведенное тестирование и сравнение двух вариантов корпоративного облака для САПР “ТороR” показало, что применение технологий виртуализации фирмы Microsoft в настоящее время является более доступным и экономичным.

**В четвертой главе** рассматриваются проблемы хранения проектных данных при реализации топологической САПР на основе облачных технологий. Общей проблемой при использовании облачных технологий в САПР для различных платформ является необходимость хранения в облачной среде всей совокупности проектных данных и обеспечение коллективного доступа к ним на основе облачных сервисов. Для решения этих задач необходимо выполнить: анализ и систематизацию информационного обеспечения (ИО) САПР; определить состав и структуру локальных проектных данных, получаемых в рамках сеанса

проектирования; выработать требования к реорганизации ИО САПР с учетом переноса проектных данных в “облако”; провести сравнительный анализ методов построения ИО облачных САПР и разработать архитектуру облачных сервисов для хранения проектных данных.

Большинство современных радиоэлектронных САПР используют в процессе работы файловую организацию информационного обеспечения. При таком подходе в рамках сеанса проектирования образуется некоторая совокупность файлов различного назначения. Для перехода к организации ИО на основе технологии БД необходимо проанализировать назначение, содержание и внутреннюю структуру используемых файлов и сформировать требования к их хранению в составе БД.

Анализ проектных данных системы TороR показал, что основой каждого конструкторского узла (печатной платы) в системе является *проект*. Проект представляет собой набор согласованных файлов, содержащих исходные и выходные данные для разработки одной печатной платы. Таким образом, для организации повторного сеанса проектирования или использования полученных результатов в последующих разработках необходимо сохранять на внешнем носителе файлы проекта. При использовании облачных технологий целесообразно хранить проекты всех пользователей на специально выделенном виртуальном компьютере в единой базе данных проектов (БДПР). Система управления БДПР должна обеспечивать выполнение следующих функций: обеспечение коллективной работы пользователей над общим проектом, выполняемым в САПР; наличие оперативного доступа из среды САПР к централизованным библиотекам компонентов; возможность сохранения в облаке текущих проектных данных, полученных на рабочей станции, и дальнейшее их использование в рамках следующего сеанса проектирования; применение в проекте единых нормативных и справочных баз для всех пользователей САПР, работающих над проектом; обеспечение формирования единого архива проектов, доступного для всех пользователей САПР; протоколирование сеансов доступа пользователей САПР к базам данных и изменений, вносимых в проектные данные.

Для построения в облаке БДПР предлагается использовать комбинированный подход хранения данных, который предполагает: непосредственное хранение *проектных файлов* в специальном хранилище; хранение *реквизитов файлов* в таблицах реляционной СУБД. При этом в таблицах базы данных создаются атрибуты, характеризующие принадлежность проектных файлов определенному проекту, иерархическую вложенность, историю изменений и т.д.

Процесс создания информационного обеспечения САПР на основе технологий баз данных включает этап разработки структурной модели предметной области (семантической модели данных). Этот этап предполагает выявление перечня физических объектов, их свойств и установление логических связей между ними. В процессе разработки БДПР для построения семантической модели в диссертации была предложена – **модель «Сущность-Связь»**. К объектам рассматриваемой предметной области относятся сущности: проекты (**Projects**), файлы проектов (**Projects\_Files**), разработчики (**Developers**), разрешения разработчиков (**Permissions**), история просмотров и изменений проектов (**Chronicles**). Наличие сущностей **Developers** и **Permissions** необходимо для обеспечения коллективного использования БДПР. Сущность **Chronicles** позволяет фиксировать в базе данных историю сеансов доступа к проектным данным. Основным типом связей между сущностями является

связь «*один ко многим*». Набор атрибутов для каждой сущности уточняется на этапе построения физической (датологической) модели данных в среде используемой СУБД.

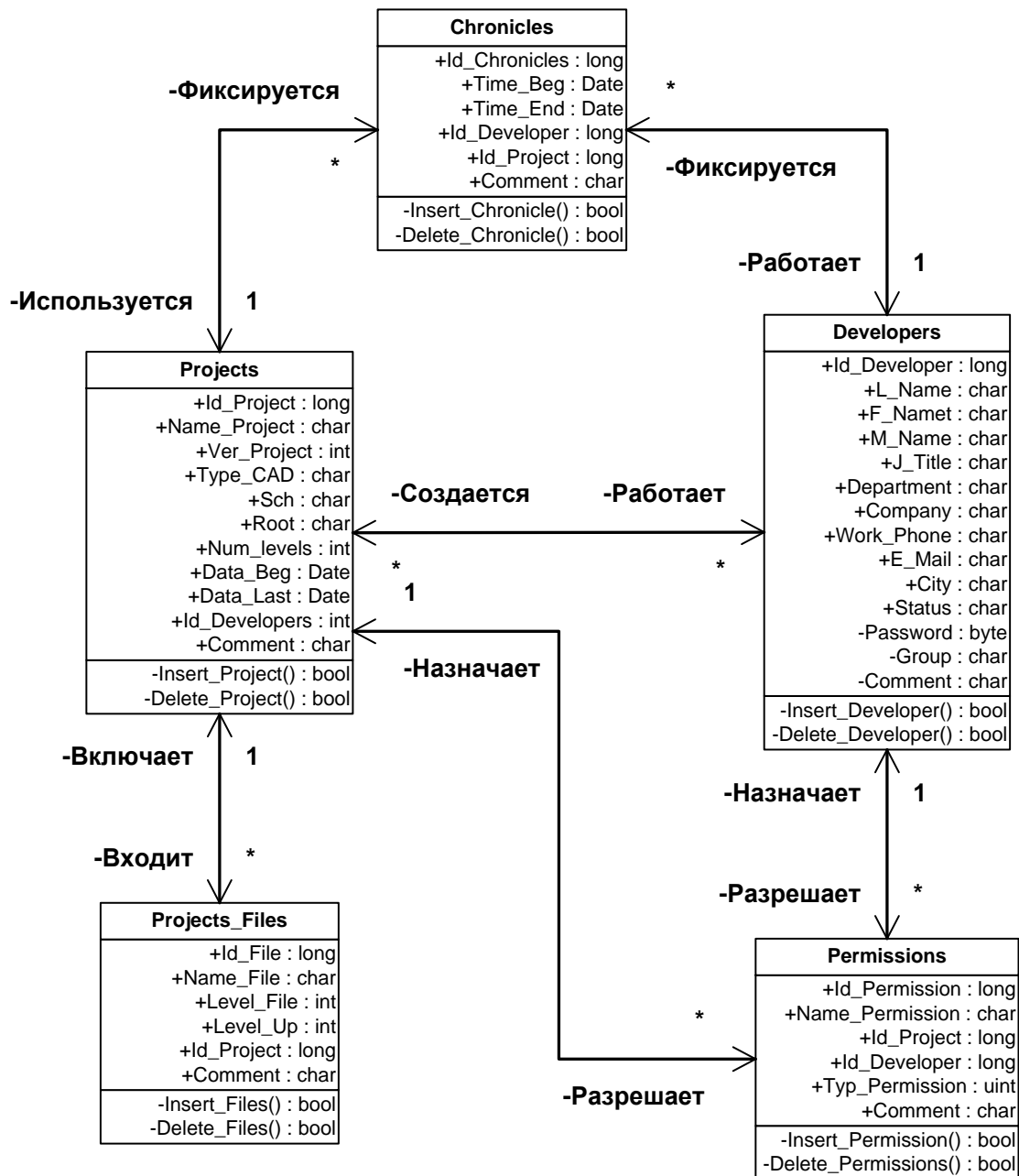


Рисунок 2 – Диаграмма классов модели DB\_Proect для БДПР

Для реализации БДПР в объектно-ориентированной среде программирования, автором основе языка UML была разработана объектно-ориентированная модель предметной области *DB\_Project*, которая представлена на рисунке. Данная модель имеет более высокую степень детализации по сравнению с ER-диаграммой. В модели определены необходимые атрибуты, ассоциации и стандартные операции, связанные с добавлением и удалением объектов для каждого класса.

Предложенная модель служит основой для построения таблиц реляционной базы данных для САПР “ТороR”, реализация которой возможна в среде универсальной промышленной СУБД. Показано, что во всех областях, связанных с управлением данными и являющихся существенными для бизнеса, возможности SQL Server 2008 либо соответствуют возможностям Oracle 11g, либо их превосходят. На основании



проведенного сравнительного анализа промышленных СУБД в качестве основного инструментального средства для реализации БДПР был выбран MS SQL Server 2008.

Для реализации приложения БДПР была использована наиболее распространенная среда для разработки прикладных программных систем высокой степени сложности Microsoft Visual Studio 2013, которая упрощает создание, отладку и развертывание Web-приложений. В рассматриваемой среде программирования имеются мощные редакторы кода и новейшие средства координирования совместной деятельности разработчиков и дизайнеров.

Автором выполняется построение схемы данных для DB\_Proect на основе объектно-ориентированной модели. Подробно описывается разработанная структура программного обеспечения БДПР DB\_Proect, ориентированного на применение совместно с топологической САПР “ТороR”. Даются примеры реализации отдельных модулей приложения. Приводятся тексты описания разработанных автором классов и методов, обеспечивающих доступ к проектным данным.

В заключительной части главы рассмотрен пример сеанса проектирования топологии печатной платы с использованием разработанной облачной версии САПР “ТороR”.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты, полученные на основе проведенных в диссертационной работе исследований.

#### **Основные результаты работы**

1. Выявлены основные критерии, характеризующие качество трассировки ПП и позволяющие на основе использования математического метода анализа иерархий Т. Саати ("Analytic hierarchy process ") и сравнительных экспериментальных исследований объективно выбрать наиболее эффективную систему проектирования ПП для ее реализации в корпоративном облаке.

2. Предложена распределенная вэб-ориентированная архитектура системы топологического проектирования, позволяющая перенести процесс проектирования в Интернет-среду и сократить стоимость САПР для промышленных предприятий, разрабатывающих радиоэлектронную аппаратуру

3. Предложена методика построения топологических САПР на основе корпоративного облака, которая обеспечивает наиболее эффективное использование САПР при ограниченном количестве лицензий.

4. Впервые выполнена реализация облачной платформы для эксплуатации САПР ТороR на основе среды VMware ESX Server. Проведены тестовые сеансы удаленного доступа к топологической САПР на основе клиента VMware vSphere eClient 5.5, которые показали эффективность предложенного решения.

5. Предложен перспективный вариант построения корпоративного облака САПР на основе платформы виртуализации в Windows Server 2012 Hyper-V. В данной среде создано облако виртуальных машин САПР с системой ТороR и сервером проектов. Проведено тестовое использование облачной ВМ ТороR в режиме удаленного доступа с рабочей станции САПР.

#### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

##### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. Мусаид А.М.О. Проблемы организации вэб-ориентированной версии системы топологического проектирования печатных плат [Текст] / А.И. Ларистов, Ю.Т. Лячек// Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ” – 2014. – №4. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ” – 2014. – №4, с.22-28.

2. Мусаид А.М.О. Организация топологической САПР на основе корпоративного облака [Текст] / А.И. Ларистов, Ю.Т. Лячек // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2015. – №9. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2015. – №9, с.11-17.

3. Musaeed А.М.О . Creating the topological CAD-system on based of the corporate cloud [Text] / A. I. Laristov, Yu. T. Lyachek // Программные системы и вычислительные методы – М.: Изд-во NotaBene– 2016. – № 1. – с.32-41. DOI: 10.7256/2305-6061.2016.1.17959.

4. Мусаид А.М.О. Информационное обеспечение топологической САПР на основе облачных технологий [Текст] / А.И. Ларистов, Ю.Т. Лячек // Кибернетика и программирование – М.:Изд-во NotaBene – 2017. – № 6. – с.16-23.

**5. Публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS:**

6. Musaeed А.М.О. Use of internet technologies for work organization with projection system [Text] / A. I. Laristov; Yu. T. Lyachek // Soft Computing and Measurements (SCM), 2015 XVIII International Conference on Year: 2015 Pages: 179 - 181, DOI: 10.1109/SCM.2015.7190448 IEEE Conference Publications.

7. Musaeed А.М.О. Information support of вэб-systems for printed circuit boards design [Text] / A. I. Laristov; Yu. T. Lyachek // 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) Year:2016 Pages: 326 - 328, DOI: 10.1109/SCM.2016.7519771 IEEE Conference Publications.

8. Musaeed А.М.О. Comparing of systems of PCB routers [Text] / A. I. Laristov; Yu. T. Lyachek; B. M. Mustafa Ahmed // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) Year: 2017 Pages: 461 - 464 , DOI:10.1109/SCM.2017.7970618 IEEE Conference Publications.

**Другие статьи и материалы конференций**

9. Мусаид А.М.О. Создание сетевой версии системы проектирования печатных плат для обучения студентов [Текст]// XX международная научно-методическая конференция СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Современное образование, технологии, качество 23 апреля 2014 г. стр, 230-231.

10. Мусаид А.М.О. Использование INTERNET технологий для организации работы с системой проектирования “Topological Router” [Текст] / А.И. Ларистов, Ю.Т. Лячек // Труды XVIII международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2015), СПб. Изд-во СПбГЭТУ, 2015. , т.2, с 98-102.

11. Мусаид А.М.О. Информационное обеспечение ВЭБ-системы проектирования печатных плат [Текст] / А.И. Ларистов, Ю.Т. Лячек // Труды XIX международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2015), СПб. Изд-во СПбГЭТУ, 2016. , т.2, с 46-50.

12. Мусаид А.М.О. Использование топологической САПР на основе корпоративного облака для дистанционного обучения [Текст] // ТУСУР Современное образование: проблемы взаимосвязи образовательных и профессиональных стандартов материалы международной научно-методической конференции 28-29 января 2016 года Россия, Томск с 87-88.

13. Мусаид А.М.О. Обучение студентов проектированию печатных плат на базе ВЭБ-ориентированной топологической системы [Текст] // Материалы XXII-ой между-методическая конференция СПбГЭТУ «ЛЭТИ» «Современное образование: содержание, технологии, качество», 20 апреля 2016 г – СПб., СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. с. 306-309.

14. Мусаид А.М.О. Сравнение систем трассировки печатных плат [Текст] / А.И. Ларистов, Ю.Т. Лячек, Б. М. Мустафа Ахмед // Труды XX международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2017), СПб. Изд-во СПбГЭТУ, 2017 , т.2, с 101-105.