

На правах рукописи



Удалов Алексей Владимирович

**МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИМИТАЦИОННЫХ
МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
НА БАЗЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ САПР**

Специальность 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования»

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург 2016

Работа выполнена на кафедре «Электронные вычислительные машины» ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Веселов Алексей Аркадьевич,
профессор кафедры ЭВМ ФГБОУ ВО
«Тверской Государственный Технический
Университет», г. Тверь.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гордеев Александр Владимирович,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский госу-
дарственный университет аэрокосмиче-
ского приборостроения» («ГУАП»), про-
фессор кафедры вычислительных сетей и
систем, Санкт-Петербург

кандидат физико-математических наук,
доцент Бродский Юрий Игоревич,
ведущий научный сотрудник Федераль-
ного государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской
академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), Москва

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
«Центрпрограммсистем», г. Тверь.

Защита состоится 29 ноября 2016 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.02 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан 27 сентября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.02
кандидат технических наук, доцент

 / Н.М. Сафьянников /

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном мире степень интеграции цифровой электронной техники (ЦЭТ) с жизнедеятельностью людей весьма высока и непрерывно повышается. Одновременно с усилением роли ЦЭТ повышаются и требования, предъявляемые к таким устройствам. Основные из них: снижение стоимости, сокращение сроков проектирования и отладки, увеличение множества функциональных возможностей. Последнее обусловлено во многом непрерывным ростом сложности ЦЭТ (увеличением количества простейших элементов ЦЭТ и связей между ними).

На современном этапе проектирование и верификация всей ЦЭТ производится с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР). Наибольший вклад в развитие САПР внесли: Г.Г. Казеннов, А.Г. Соколов, П.В. Савельев, В.В. Конякин, Дж. Армстронг, В.Н. Бадулин, Ю.М. Барнаулов, В.А. Бердышев и другие. Одним из наиболее эффективных средств, позволяющих повысить эффективность САПР устройств ЦЭТ, является использование имитационных моделей. Среди большого их многообразия наибольшую популярность во всем мире получили модели, основанные на использовании математического аппарата сетей Петри (СП). Большой вклад в становлении и развитие СП и ее многочисленных расширений внесли такие ученые, как: К. А. Петри, Дж. Питерсон, Г. Розенберг, В. Рейзиг, К. Йенсен, А. Валмари, Т. Мурата, Ю. Г. Карпов, В. Е. Котов, С. А. Юдицкий, И. А. Ломазова и другие.

Применительно к моделированию устройств ЦЭТ заметный вклад внесли такие ученые как В. И. Варшавский, Дж. Кортаделла, А. В. Яковлев, М. Кишиневски, А. Кондратьев, А. А. Веселов и другие. Их работы позволили получить более совершенные модели на основе СП и расширить их аналитические возможности.

Основной недостаток традиционных (монолитных) моделей САПР заключается в том, что после выполнения синтеза они полностью теряют структуру объекта. Кроме того, увеличение размера модели приводит к заметному снижению их быстродействия, которое может быстро достигать таких значений, когда практическое их использование становится либо затруднительным, либо нецелесообразным. Таким образом, область применения таких моделей ограничена небольшими размерами.

Наиболее перспективными представляются решения, предложенные К. Йенсеном в разработанной им системе «CPN-Tools» и в работах А.А. Веселова для построения распределенной DPN-модели. Однако в системе К. Йенсена, модель реализована не как распределенная, а скорее как встраиваемая. Иначе говоря, модель имеет только визуальное распределённое отображение и остается по сути монолитной. Такой подход не позволяет полностью использовать преимущества, предоставляемые распределенными моделями. В связи с этим, актуальной задачей является переход от монолитных моделей к моделям с распределённой архитектурой, что позволит расширить область применения и тем самым поднять эффективность их применения при проектировании устройств цифровой автоматики и вычислительной техники. Наиболее перспективным решением представляется подход, реализованный в распределенной DPN-модели, которая и была выбрана в качестве прототипа (базового решения).

Фундаментальные работы таких ученых, как: Р. Фуджимото, Э. Таненбаум, А. А. Александров, Ю. И. Бродский, А. А. Гладцын, позволили сформулировать основные принципы построения распределенных систем. Несмотря на имеющиеся достижения в области построения распределенных систем, их непосредственное использование в имитационных моделях на основе СП представляет собой достаточно сложную задачу, требующую учета особенностей их поведения и проведения дополнительных исследований, связанных с поиском наиболее эффективных решений. Решению этих задач и посвящена данная работа.

Объект исследования – инструментальные средства САПР цифровой электронной техники.

Предмет исследования – методы построения распределённых дискретно-событийных моделей и инструментальных средств САПР цифровой электронной техники.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности САПР ЦЭТ на основе разработки методов построения распределённых имитационных моделей. Это позволяет расширить область применения имитационных моделей в САПР и повысить их быстродействие.

Основная задача исследования – разработка методов построения распределённых имитационных моделей САПР цифровой электронной техники.

Задачи исследования. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ существующих достижений в использовании распределённых имитационных моделей в САПР ЦЭТ, обзор современных технологий построения распределённых систем и выбор наиболее перспективных решений для построения САПР ЦЭТ с использованием распределённых моделей;

2. Разработка подходов к построению распределённых моделей и размещению её компонент в разных адресных пространствах (в разных приложениях и на разных компьютерах);

3. Разработка способов повышения эффективности распределённых моделей при помощи оптимизации работы потоков алгоритма функционирования;

4. Разработка экспериментальной инструментальной системы распределённого моделирования устройств ЦЭТ и оценка эффективности применения предложенных решений.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось с использованием методов теории множеств, математической логики, графов, конечных автоматов, сетей Петри, распределённых систем, параллельных вычислений, автоматизированного проектирования, объектно-ориентированного проектирования и программирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена и разработана методика централизованного конфигурирования (настройки), размещения (загрузки), организации связей и функционирования компонент распределенной модели, размещаемой в одном приложении, в различных приложениях одного компьютера или на разных компьютерах локальной сети (п. 1 и 3 паспорта специальности);

2. Предложен и разработан блок конфигурирования и алгоритм взаимодействия блоков конфигурирования при решении задач (для реализации методики)

конфигурирования (настройки) и размещения (загрузки) компонент распределённой модели (п. 1 и 3 паспорта специальности);

3. Предложен и разработан алгоритм взаимодействия блоков конфигурирования при решении задач (для реализации методики) функционирования и организации связей как внутри самой распределённой модели, так и внутри подчиненных компонент, что позволяет детализировать нужный иерархический уровень модели устройства ЦЭТ (п. 4 паспорта специальности);

4. Предложен и разработан алгоритм параллельного продвижения модельного времени компонент распределённой модели (п. 1 и п. 3 паспорта специальности);

5. Предложен и разработан алгоритм последовательно-параллельного продвижения модельного времени компонент распределённой модели, позволяющий повысить её быстродействие и сбалансировать нагрузку процессоров (ядер) компьютера (п. 1 и п. 3 паспорта специальности).

Практическая значимость работы заключается в следующих результатах:

1. Разработан экспериментальный образец системы распределённого имитационного моделирования, позволяющий в процессе проектирования схемного решения устройства ЦЭТ автоматически (в фоновом режиме) получать её имитационную модель. Причем связи с условным её отображением в виде схемы позволяют воздействовать на изображение проектируемого решения и наблюдать соответствующую ответную реакцию распределённой имитационной модели. Такая особенность данной системы позволяет заметно ограничить использование специалиста по моделированию в процессе проектирования и тем самым повысить его эффективность;

2. Разработана библиотека условных графических изображений типовых функциональных устройств и их распределённых имитационных моделей и механизм их взаимодействия;

3. Для пополнения состава библиотечных элементов разработана подсистема формирования их условных графических изображений и привязки к соответствующим имитационным моделям;

4. Впервые получены экспериментальные данные, характеризующие эффективность распределённых имитационных DPN-моделей по сравнению с их монолитными аналогами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика централизованного конфигурирования, загрузки и организации связей между компонентами, размещёнными в разных приложениях и на разных компьютерах локальной сети.

2. Блок конфигурирования и алгоритм взаимодействия таких блоков при решении задач настройки и загрузки компонент распределённой модели на один и несколько компьютеров локальной сети.

3. Алгоритм взаимодействия блоков конфигурирования при решении задач функционирования и организации связей как внутри самой модели, так и внутри подчиненных компонент, позволяющий реализовать детализацию не только структуры, но и внутреннего состояния нужного иерархического уровня модели в ходе имитационного эксперимента.

4. Алгоритм параллельного продвижения модельного времени распределённой модели и используемый в его работе способ синхронизации компонент при их размещении в разных адресных пространствах.

5. Алгоритм последовательно-параллельного продвижения модельного времени распределённой модели при размещении её компонент на одном и нескольких компьютерах локальной сети.

Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций диссертации основана на корректном использовании математического аппарата теории сетей Петри, теории параллельных вычислений и распределённых систем, и подтверждается экспериментальной проверкой предложенных методов и алгоритмов при разработке и исследовании поведения распределённых моделей САПР ЦЭТ. Выводы и предложения диссертационного исследования не противоречат известным теоретическим и практическим результатам, сформулированным в трудах отечественных и зарубежных ученых в данной области исследований.

Внедрение результатов работы и экспериментальная оценка работоспособности и эффективности предлагаемых подходов выполнены на предприятиях г. Твери.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на:

1. XIV Международная научно-техническая конференция «Информационно-вычислительные технологии и их приложения», г. Пенза, 2010 г.

2. XXIX Международной научно-технической конференции «Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании», г. Пенза, 2012 г.

3. XXX Международной научно-технической конференции «Математические методы и информационные технологии в экономике, социологии и образовании», г. Пенза, 2012 г.

4. XIII Международная научно-техническая конференция «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике», г. Пенза, 2013 г.

5. II международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом», г. Новосибирск, 2015 г.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 18 работах, из них 4 работы опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 6 работ по материалам конференций, 4 статьи – в других источниках.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, 2 приложений, списка литературы из 75 наименований и включает 154 страницы машинописного текста, 51 рисунок, 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности темы исследований, формулировке цели и основных задач исследования по повышению эффективности распределённых имитационных моделей САПР ЦЭТ. Показана теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе выполняется анализ особенностей устройств ЦЭТ, проявляемых в ходе эксплуатации и проектирования. Важнейшая из них заключается в том, что устройства ЦЭТ являются сложными распределёнными и иерархическими системами, состоящими из большого числа элементов разной сложности. Совокупность таких функциональных элементов вместе с соответствующими связями между ними позволяет реализовывать требуемое поведение системы в целом.

Таким образом, каждый функциональный элемент ЦЭТ может функционировать автономно и взаимодействовать с другими элементами и со своим внешним окружением путем обмена сообщениями в виде логических сигналов. В качестве базового и наиболее перспективного варианта модели для проведения исследований был принят распределённый вариант DPN-модели. Этот выбор определялся, в том числе, и тем обстоятельством, что такая архитектура модели позволяет легко представить компоненты распределённой модели в виде функционального модуля с соответствующим интерфейсом, состоящих из соответствующих наборов входных и выходных сигналов.

Несмотря на то, что моделирование ЦЭТ может быть выполнено при помощи множества математических аппаратов: систем дифференциальных уравнений, систем логических уравнений, конечных автоматов, систем массового обслуживания (СМО) и других, в основном в современных САПР ЦЭТ используются два математических аппарата: системы дифференциальных уравнений и теория автоматов. Первый из них обладает высокой мощностью и вычислительной затратностью, что делает невозможным его использование при моделировании сложной ЦЭТ. Теория автоматов же описывает лишь отдельные устойчивые состояния поведения ЦЭТ. Такое упрощенное представление цифровых схем в виде матриц, систем логических уравнений или программных описаний по сравнению с системами дифференциальных уравнений, с одной стороны, значительно повышает быстродействие моделей ЦЭТ, что позволяет на современном этапе производить верификацию интегральных схем высокой сложности. С другой стороны, при этом значительно снижаются описательные и аналитические возможности таких моделей. Поэтому такие особенности функционирования ЦЭТ как переходные процессы, параллелизм и другие, не могут быть исследованы.

В отличие от конечных автоматов сети Петри (СП) позволяют эффективно моделировать такие особенности ЦЭТ. Но наиболее важным их отличием является наличие развитых аналитических возможностей, которые позволяют автоматизировать процессы анализа работоспособности и качества функционирования проектируемых объектов. Таким образом, математический аппарат СП является достаточно перспективным средством для построения моделей ЦЭТ. В этой связи весьма актуальной является разработка эффективных принципов реализации иерархических и распределённых моделей на основе СП.

Анализ существующих распределённых систем моделирования показал, что наиболее эффективными в настоящее время являются подходы, предложенные новосибирскими и пермскими учеными – «Мера» и «Triad». Однако оба этих решения обладают существенным недостатком: используется специальный язык моделирования, что требует привлечения к работе специалиста по моделированию. Кроме того, сама система представляется довольно сложной и способной эффективно функционировать только при использовании очень мощной вычислительной техники.

В качестве наиболее эффективного инструментального средства разработки распределенных моделей особо была выделена система «CPN-tools» (К. Йенсен), позволяющая описывать распределенные системы реального мира в виде раскрашенных сетей Петри. Недостаток этого инструмента заключается в том, что он позволяет только описывать объекты как иерархические системы, однако, для проведения имитационного эксперимента описания иерархических моделей используются лишь для синтеза (встраивания в монолитную модель). То есть при кажущейся визуальной распределённости модели (её отображения), сама модель продолжает оставаться монолитной.

В результате анализа современных САПР ЦЭТ и распределённых систем моделирования были сформулированы требования к разрабатываемой системе, основными из которых являются:

- возможность размещать подчиненные компоненты внутри одного адресного пространства, в нескольких приложениях внутри одного компьютера или на разных компьютерах локальной сети;
- наличие централизованного управления конфигурированием, размещением и подпиской на взаимодействие между компонентами распределенной модели;
- способность распределённой модели отображать своё состояние непосредственно на отображении проектируемого схемного решения в ходе проведения имитационного эксперимента.

Во второй главе рассматривается подход к реализации централизованного (при помощи единой консоли управления) автоматического размещения (загрузки), организации связей и взаимодействия компонент (её функционального модуля и его внешнего представителя) в разных адресных пространствах посредством сетевого взаимодействия между соответствующими блоками конфигурирования.

Обычно для реализации удалённого взаимодействия между элементами распределённых систем используют одну из следующих технологий: Sockets (сокеты), .NET Remoting, Web Services (Web службы), Message Queuing (очереди сообщений), Windows Communication Foundation (WCF).

Технология .NET Remoting позволяет обращаться к удаленным объектам посредством ссылок (маршаллинг по ссылке), что позволяет избежать разработки правил обмена сообщениями (протокола). Несмотря на то, что эта технология обычно используется в клиент-серверных приложениях, в данной работе она используется для взаимодействия между равноправными компонентами распределённых моделей.

Для использования выбранной технологии предлагается использовать специальный блок конфигурирования (рисунок 1), унифицирующий доступ ко всем, размещенным в его домене, функциональным модулям компонент. Кроме того, такие блоки взаимодействуют между собой для организации связей между компонентами, автоматической загрузки описаний моделей, отправки команд и т.д. При этом используется единый виртуальный канал обмена сообщениями между двумя блоками конфигурирования. Схема взаимодействия частей модели показана на рисунке 2.



Рисунок 1 – Структура блока конфигурирования компонент.

Конфигурирование (настройка), размещение (загрузка), организация связей и управление имитационным экспериментом выполняется централизованно, т.е. один из компьютеров используется для управления. Это достигается при помощи установки соединения между блоком конфигурирования главного и остальных компьютеров, а также использования соответствующих команд (унифицированного интерфейса) конфигурирования. По завершении формирования конфигурации распределенной модели главный компьютер (если он не содержит в своей оперативной памяти работающих компонент) может быть отключен и не участвует в работе распределенной модели.

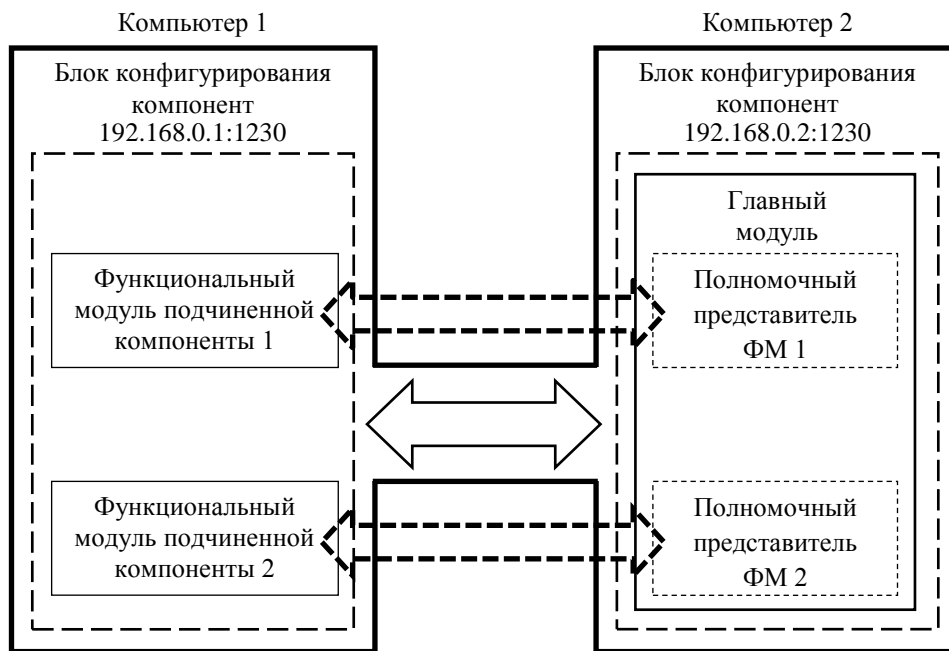


Рисунок 2 – Использование специального блока конфигурирования, унифицирующего доступ ко всем, размещенным в его домене функциональным модулям компонент.

Первый этап загрузки распределённой модели заключается в формировании описания структуры распределенной модели в виде дерева. Это описание предназначено для загрузки подчиненных компонент модели на целевые компьютеры. После

этого компоненты распределенной модели загружаются в оперативную память соответствующего компьютера. В случае удаленного размещения компоненты необходимо реализовать отправку команды целевому компьютеру (блоку конфигурирования) на ее загрузку при помощи его локальной библиотеки описаний.

Поскольку количество уровней в модели может быть произвольным, а распределённая модель представляет собой сильноветвящееся дерево, алгоритм построен по рекурсивному принципу. Иными словами, по окончании загрузки главной компоненты выполняется загрузка подчиненных ей компонент путем рекурсивного вызова для них такого же алгоритма. Таким образом компоненты модели автоматически загружаются на назначенные им компьютеры.

Алгоритм завершается установкой связей между владеющей и подчиненной компонентами (взаимной подпиской). Особенностью технологии Remoting является использование полномочных представителей (прокси) для взаимодействия с удаленными объектами. Иными словами, взаимодействие с опубликованным удаленным объектом осуществляется через его полномочного представителя, созданного в локальном домене. Удаленный объект и его представитель связаны между собой при помощи внутреннего механизма обмена сообщениями Remoting. Эта особенность приводит к возникновению необходимости учитывать взаимное расположение компонент распределенной модели при выполнении взаимосвязи модулей и их полномочных представителей. В зависимости от взаимного расположения либо подписка на события осуществляется напрямую, либо посредством отправки команд о необходимости подписки на удаленных компьютерах. Поэтому реализация взаимной подписки компонент модели требует особого рекурсивного алгоритма, выполняющего необходимые операции в зависимости от взаимного расположения компонент распределенной модели.

После реализации описанных решений были проведены экспериментальные исследования быстродействия и эффективности моделей. Оценка быстродействия моделей осуществлялась путём измерения интервала модельного времени, на который сможет продвинуться модель за фиксированный интервал астрономического времени. Для обеспечения непрерывности работы модели в масштабе модельного времени производилась подача инверсных сигналов с частотой, определяемой временем реакции на них модели. Очевидно, что та модель, которая за одинаковый интервал астрономического времени продвинет своё модельное время на большую величину, обладает наибольшим быстродействием.

Для оценки эффективности моделей было предложено использовать соотношение характеристик экспериментальной (предлагаемой) и базовой (прототипа) моделей (формулы 1, 2, 3). Очевидно, что модель одного и того же объекта, обладающая меньшим размером, более эффективна при сохранении в оперативной памяти или файле. При определении эффективности по быстродействию модели следует исходить из обратного соотношения. В качестве базовой (прототипа) использовалась монолитная модель. Все эксперименты проводились с использованием моделей интегральных микросхем серии SN74АС.

$$E_{ОП} = \frac{S_{ОП.М}}{S_{ОП.Р}} \quad (1), \quad E_{описания} = \frac{S_{описания.М}}{S_{описания.Р}} \quad (2), \quad E_{быстр} = \frac{\Delta t_P}{\Delta t_M} \quad (3), \quad \text{где:}$$

$E_{ОП}$ – эффективность при хранении в оперативной памяти,
 $S_{ОП.М}$ – размер монолитной модели в оперативной памяти,
 $S_{ОП.Р}$ – размер распределённой модели в оперативной памяти,
 $E_{описания}$ – эффективность при хранении описания,
 $S_{описания.М}$ – размер файла описания монолитной модели,
 $S_{описания.Р}$ – размер файла описания распределённой модели,
 $E_{быстр}$ – эффективность по быстродействию,
 Δt_P – интервал модельного времени распределённой модели,
 Δt_M – интервал модельного времени монолитной модели.

Проведенные экспериментальные исследования (рисунок 3) позволили сформулировать следующие выводы о характеристиках монолитных и распределенных имитационных моделей ЦЭТ:

1. Монолитные модели обладают наибольшим быстродействием при моделировании ЦЭТ небольшой сложности (менее 250 базисных элементов). Кроме того, такие модели требуют меньше оперативной памяти и для выполнения имитационного эксперимента, и для их хранения.

2. С ростом сложности электронного устройства их распределенные модели становятся более быстродействующими, чем монолитные. Кроме того, повышается эффективность хранения модели. Это связано с использованием ссылочного хранения повторяющихся модулей. Несмотря на это, объем требуемой для имитационного эксперимента оперативной памяти при работе с распределенными моделями превышает аналогичный показатель монолитных моделей. Причиной этому является необходимость в дополнительном объеме служебной информации, содержащей сведения о структуре модели.

Проведены экспериментальные исследования быстродействия распределённой модели при размещении её компонент в разных приложениях и на разных компьюте-

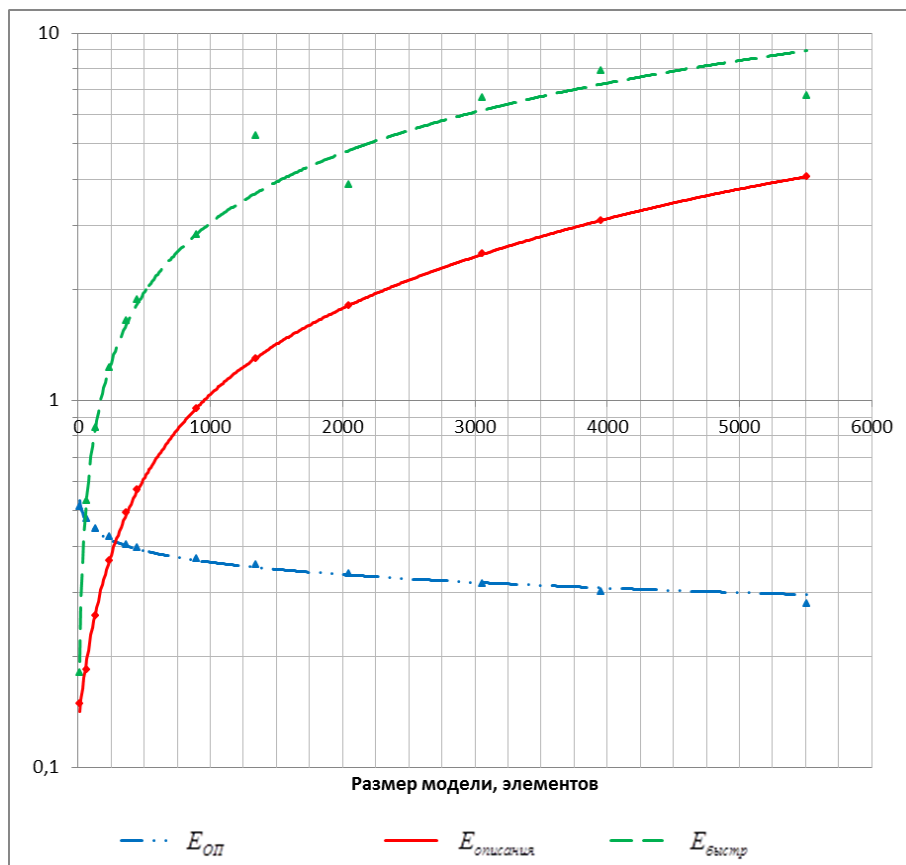


Рисунок 3 – Зависимость эффективности распределённой модели перед монолитной от её размера.

рах (в качестве базовой использовалась распределённая модель, функционирующая в одном приложении). По результатам сформулированы следующие выводы:

1. Быстродействие распределенной модели, компоненты которой размещены в разных приложениях одного компьютера, значительно ниже быстродействия той же модели в одном приложении. С ростом сложности модели быстродействие повышается, но не превышает аналогичного значения распределенной модели, размещённой в одном адресном пространстве.
2. Быстродействие распределенной модели, компоненты которой размещены на разных компьютерах, еще ниже, чем в случае размещения модели в двух приложениях одного компьютера. Характер изменения быстродействия при росте сложности модели аналогичен предыдущему случаю.

Такие результаты объясняются следующими причинами. Во-первых, влиянием накладных расходов на формирование и разбор пакетов для передачи сообщений от компоненты к компоненте. Во-вторых, что более важно, добавляются затраты времени на передачу сформированных пакетов по каналам связи. Для ослабления влияния указанных факторов были предложены способы продвижения модельного времени с помощью потоков, рассмотренные в главе 3.

В третьей главе описываются подходы к повышению быстродействия распределённой модели. Для уменьшения влияния задержек при передаче сообщений на быстродействие модели в начале предлагается организовать работу отдельных подпрограмм алгоритма работы модели в отдельных потоках, выполняемых асинхронно (параллельно). Под параллельной работой понимается одновременное (или квазиодновременное, в случае разделения времени одного процессора) выполнение нескольких подпрограмм. Предполагается, что устранение ожидания одной подпрограммой завершения другой, не блокирующей её выполнения, подпрограммой, позволит повысить быстродействие модели и скрыть задержки при передаче по каналам связи. Пример алгоритма параллельного продвижения модельного времени компонент распределённой модели представлен на рисунке 4.

Однако экспериментальные исследования показали низкую эффективность такого подхода. Снижение эффективности модели обусловлено следующими причинами:

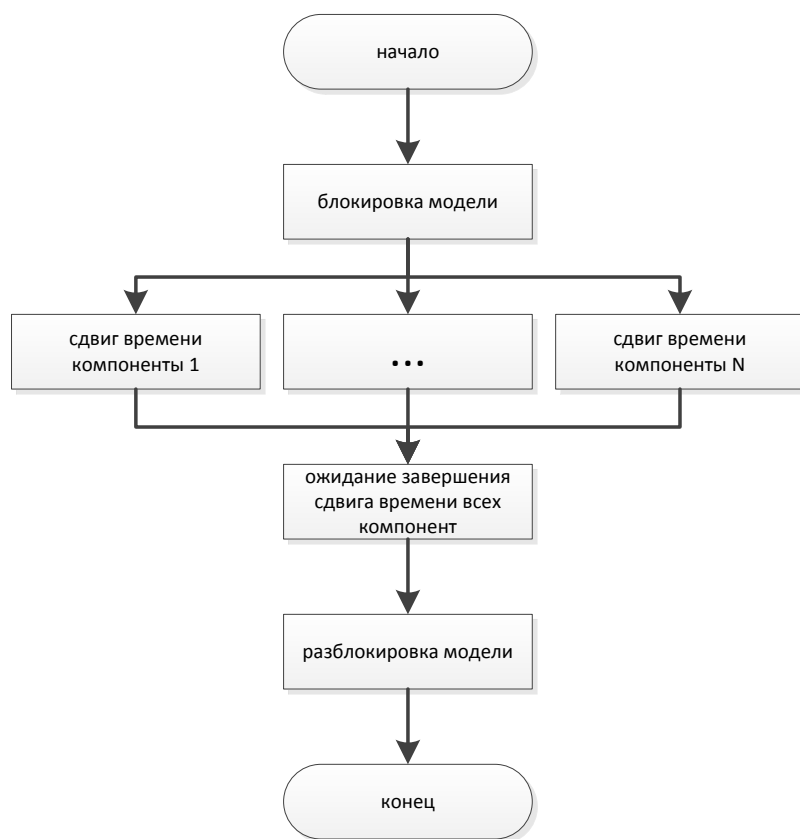


Рисунок 4 – Параллельный алгоритм продвижения модельного времени компонент распределённой модели.

- время выполнения подпрограммы продвижения модельного времени каждой компоненты распределенной модели значительно меньше времени, необходимого на выделение необходимых ресурсов и подготовку нового потока к исполнению;
- чрезмерное превышение числа создаваемых потоков над количеством одновременно выполняемых приводит к слишком частому переключению контекста выполнения и значительному времени ожидания неактивных потоков.

С целью устранения указанных факторов было пересмотрено решение задачи декомпозиции алгоритма функционирования распределенной модели. Основной идеей модифицированного подхода стало агрегирование подпрограмм продвижения модельного времени компонент распределенной модели в группы, выполняемые параллельно. Число таких групп определяется количеством процессоров (процессорных ядер) компьютера. Подпрограммы, составляющие одну группу, выполняются последовательно (рисунок 5). Такой алгоритм продвижения времени получил название последовательно-параллельного. При его использовании увеличивается время выполнения каждого потока, причем число таких потоков уменьшается до количества максимально возможного для одновременного выполнения, а время ожидания неактивных потоков значительно сокращается.

Взаимодействие между подпрограммами в потоках реализовано посредством механизма подписки и реакции на происходящие в компонентах распределенной модели события. Синхронизация подпрограмм алгоритма функционирования использует принцип взаимного исключения и может быть организована аналогично принципу синхронизации событий и продвижения модельного времени распределенной модели. То есть, продвижение глобального времени блокируется до тех пор, пока подпрограммы продвижения модельного времени всех компонент не будут завершены. Реализация оповещения побочными потоками главного потока приложения об их завершении может быть выполнена посредством реакции на событие или изменения состояния счетчика завершивших работу подпрограмм, расположенного в общей для потоков выполнения памяти.

Подпрограмма синхронизации выполняется каждый раз при завершении работы группы подпрограмм продвижения модельного времени и должна быть использована одновременно не более чем одним потоком выполнения. Другие завершившиеся пото-

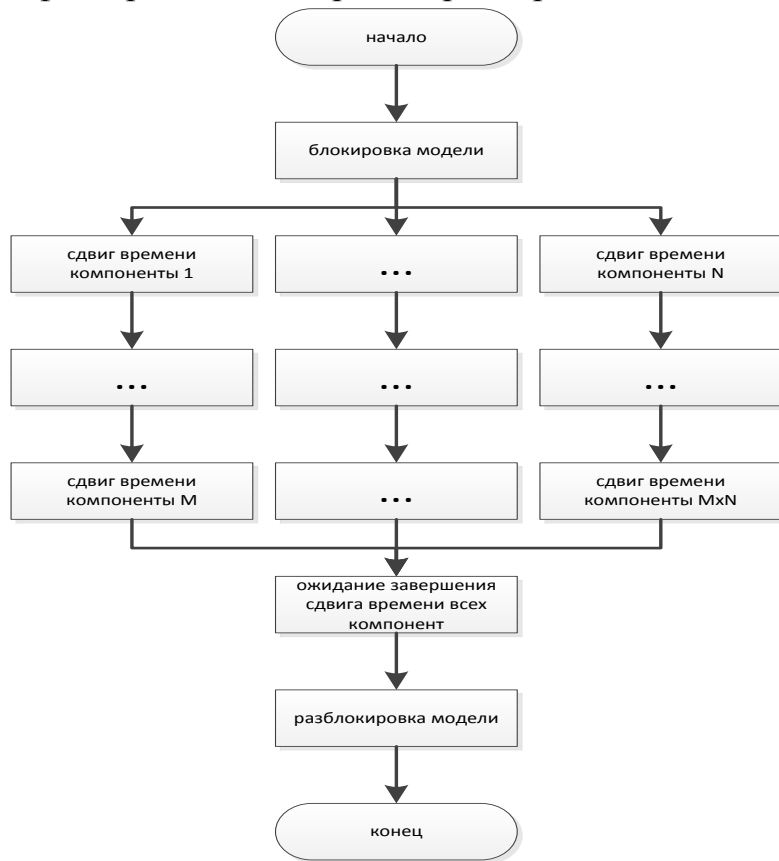


Рисунок 5 – Последовательно-параллельный алгоритм продвижения модельного времени компонент распределённой модели.

ки в таком случае будут ожидать завершения подпрограммы синхронизации и осуществят её вызов только после этого.

Все это позволило снизить количество вызовов подпрограммы синхронизации потоков и тем самым снизить общее время выполнения. Программная реализация была модифицирована с целью уменьшения накладных расходов при работе с потоками следующим образом:

- применение пула потоков, содержащего уже готовых к работе потоков;
- повторное использование ресурсов завершивших работу потоков.

Были проведены экспериментальные исследования быстродействия распределённой модели, функционирующей с использованием разработанного последовательно-

параллельного алгоритма продвижения модельного времени, результаты которых представлены на рисунке 6. В качестве базовой использовалась распределённая модель в одном приложении, функционирующая с использованием традиционного (последовательного) алгоритма продвижения модельного времени. По результатам исследований сформулированы следующие выводы:

1. Быстродействие моделей малой сложности наиболее высоко при использовании последовательного функционирования компонент (традиционного подхода).
2. Функционирование распределённых моделей средней и высокой сложности характеризуется наилучшим быстродействием при последовательно-параллельной работе её компонент. Причем для работы с моделями средней сложности рекомендуется использовать компьютеры с небольшим числом процессоров (ядер). Увеличение числа процессоров приводит к повышению быстродействия сложных моделей.

Кроме того, были проведены экспериментальные исследования быстродействия распределённой модели, компоненты которой размещены в разных адресных пространствах и функционируют с использованием разработанного последовательно-параллельного алгоритма продвижения модельного времени.

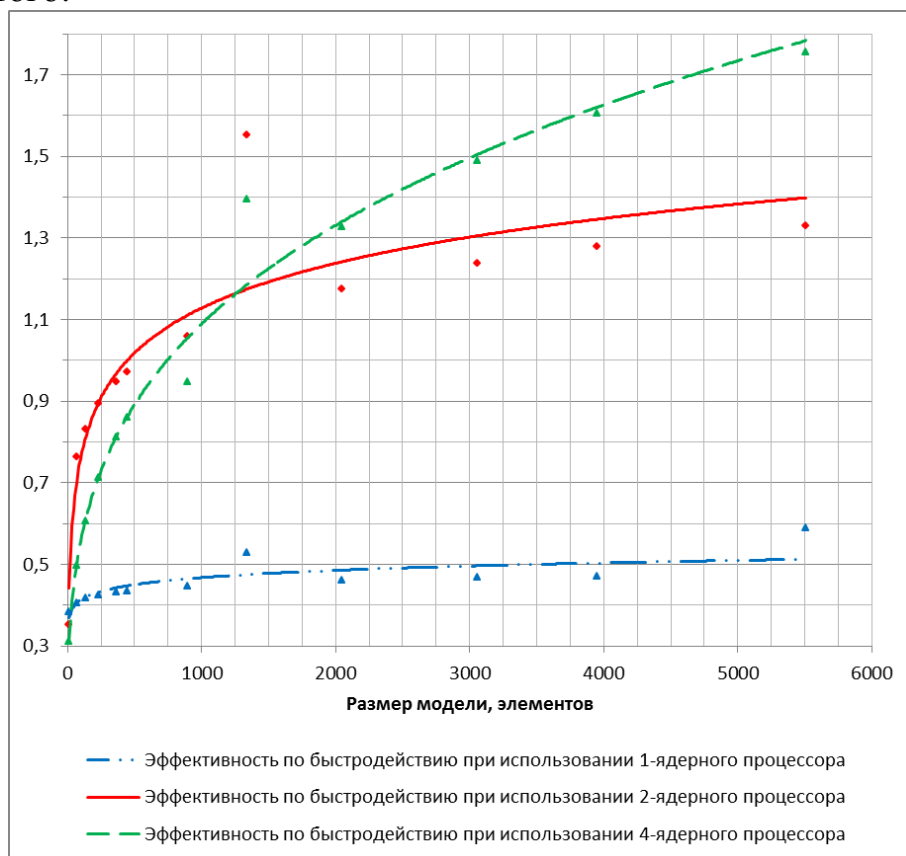


Рисунок 6 – Зависимость эффективности по быстродействию от размера распределённой модели, функционирующей с использованием последовательно-параллельного алгоритма по сравнению с моделью, использующей последовательный алгоритм.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 7. В качестве базовой использовалась распределённая модель, компоненты которой размещены в разных адресных пространствах, но используют традиционный (последовательный) алгоритм продвижения модельного времени. По результатам исследований сформулированы следующие выводы:

1. Быстродействие моделей малой сложности (до 1250 и 2000 элементов для размещения в двух приложениях и на двух компьютерах соответственно) наиболее высоко при использовании последовательного функционирования компонент (традиционного подхода).

2. Для моделей средней сложности (от 1250 до 2000 элементов) наиболее эффективным является использование последовательно-параллельного алгоритма и размещение компонент модели в двух приложениях.

3. Модели высокой сложности (более 2000 элементов) наиболее эффективны при использовании последовательно-параллельного алгоритма и размещении компонент модели на разных компьютерах.

Таким образом, разработанный подход позволил снизить влияние задержек при формировании, разборе и передаче сообщений по сети и значительно повысить быстродействие распределённых моделей сложной цифровой электронной техники при размещении их компонент, как в сети, так и на одном компьютере.

В четвертой главе рассматривается разработанная инструментальная система распределённого имитационного моделирования устройств ЦЭТ.

Наиболее эффективным представляется подход, который представляет систему моделирования как композицию нескольких подсистем, которые разработаны в соответствии с нуждами определённого класса пользователей. Так, например, специалисту по моделированию ЦЭТ, который разрабатывает встроенную в систему библиотеку

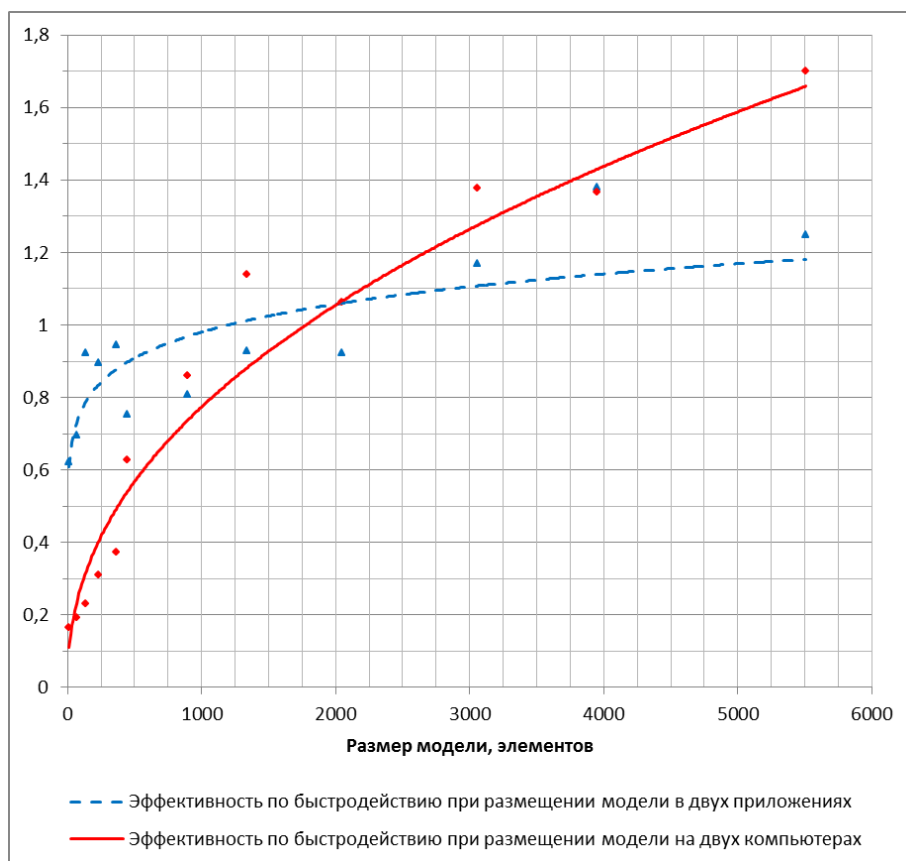


Рисунок 7 – Зависимость эффективности по быстродействию от размера распределённой модели, функционирующей в разных адресных пространствах с использованием последовательно-параллельного алгоритма по сравнению с моделью, использующей последовательный алгоритм.

моделей, необходим редактор модели в терминах D-сетей Петри с графовой визуализацией. Проектировщику ЦЭТ требуется редактор с визуализацией в терминах схемных решений. В случае необходимости построения новых базовых блоков из разработанных моделей при помощи этих редакторов используется соответствующая отдельная подсистема. Пример структуры распределенной системы моделирования ЦЭТ, реализующей такой подход, показан на рисунке 8.

Редактор графов представляет собой программное средство, обладающее графическим интерфейсом, для редактирования модели посредством её графического отображения. При создании модели организуется обмен сообщениями между моделью и её визуализацией, которая позволяет, с одной стороны, реагировать на действия пользователя, а с другой стороны отображать изменения состояния модели, вызванные её функционированием. Тем не менее, блок конфигурирования, управляющий содержащимися в ней моделями, независим от подсистемы графического отображения и взаимодействие между ними может быть прервано без потери работоспособности – модель будет продолжать функционировать, в то время как визуализация будет отображать состояние модели, в котором она была до потери связи. Несмотря на то, что графовое представление содержит в себе все необходимые сведения для построения модели, сохраненные модели и их визуализации хранятся в разных библиотеках. Это объясняется тем, что при необходимости загрузки какой-либо модели подчиненной компоненты, нет необходимости в обработке и загрузке её визуализации.

Редактор схемных решений представляет собой также графическое приложение для редактирования модели цифровой электроники посредством её визуализации в терминах схемных решений. Блок имитационного моделирования, управляющий разрабатываемой моделью, устанавливает взаимодействие с её схемной визуализацией, аналогично связи с графовой визуализацией в редакторе графов. Однако редактор графов предполагает работу над небольшими монолитными моделями, в то время как редактор схемных решений ориентирован на работу с моделями сложных устройств. Поэтому такое взаимодействие может быть организовано как напрямую между двумя подсистемами, так и посредством блока конфигурирования и удаленного взаимодействия.



Рисунок 8 – Структура системы распределённого имитационного моделирования цифровой электронной техники.

Однако редактор графов предполагает работу над небольшими монолитными моделями, в то время как редактор схемных решений ориентирован на работу с моделями сложных устройств. Поэтому такое взаимодействие может быть организовано как напрямую между двумя подсистемами, так и посредством блока конфигурирования и удаленного взаимодействия. Это необходимо, когда требуется визуализация модели, расположенной в удаленном адресном пространстве. Кроме того, компоненты распределенной модели могут также находиться в разных адресных пространствах.

Редактор базовых блоков является обладающим графическим интерфейсом приложением, позволяющим создавать новые базовые блоки, представляющие из себя построенные при помощи одного из редакторов модели. Визуализация каждого базового блока представляет собой условно-графическое отображение в виде модуля микросхемы и разрабатывается при помощи графического интерфейса. По завершении посредством графового или схемного отображения выполняется организация связей между моделью и разработанной визуализацией. В зависимости от используемого при организации связей отображения модели программное средство работает в двух режимах: графовом или схемном.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выявлены характерные особенности поведения и моделирования ЦЭТ, выбран математический аппарат D-сетей Петри в качестве используемого в данной работе, проанализированы существующие имитационные модели и математические аппараты САПР ЦЭТ и системы распределённого имитационного моделирования.

2. Предложена методика конфигурирования (настройки), размещения (загрузки) и организации связей между компонентами в разных адресных пространствах, т.е. в разных приложениях одного компьютера и на нескольких компьютерах локальной компьютерной сети. Для реализации предложенной методики разработаны блок конфигурирования и алгоритмы взаимодействия блоков конфигурирования при размещении, организации связей и управлении компонентами распределённой модели.

3. Разработаны параллельный и последовательно-параллельный алгоритмы продвижения модельного времени компонент распределённой модели. Последовательно-параллельный алгоритм позволяет повысить быстродействие моделей и сбалансировать нагрузку процессоров (ядер) компьютера.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что рост быстродействия при использовании такого алгоритма продвижения модельного времени достигает 75% при размещении компонент модели в одном приложении, 25% – в нескольких приложениях одного компьютера, 70% – на разных компьютерах локальной компьютерной сети.

Эксперименты проводились с моделями, размером до 5,5 тыс. элементов с использованием компьютеров с 4-ядерными процессорами тактовой частотой 3,4 ГГц. Наблюдалась тенденция к возрастанию эффективности моделей по быстродействию при увеличении числа процессоров и размеров моделей.

4. Разработана экспериментальная система распределённого имитационного моделирования устройств ЦЭТ, реализующая разработанные подходы и алгоритмы с использованием современных технологий сетевого взаимодействия и многопоточного программирования, состоящая из трех редакторов, позволяющих:

- создавать монолитные и распределённые модели базовых блоков устройств ЦЭТ;
- разрабатывать условно-графическое отображение (УГО) микросхем и их функциональных элементов устройств ЦЭТ и осуществлять привязку к модели с использованием графовой и схемной визуализации;
- осуществлять построение моделей схемных решений ЦЭТ посредством разработки их УГО.

5. Разработанная система предлагает проектировщику новый вид взаимодействия с моделями устройств ЦЭТ – последовательную детализацию нужного иерархического уровня в ходе имитационного эксперимента.

6. Впервые получены результаты по оценке эффективности распределённых моделей по сравнению с их монолитными аналогами.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Удалов, А. В. Использование технологий .NET FRAMEWORK для реализации сетевого взаимодействия компонент распределенной модели цифровой электронной техники / А. В. Удалов // М.: Научтехлитиздат. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 8. – С. 10.

2. Удалов, А. В. Алгоритмическое обеспечение сетевого управления компонентами распределенных моделей цифровой электронной техники / А. В. Удалов // М.: Научтехлитиздат. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2015. – №3. – С. 32.

3. Удалов, А. В. Экспериментальное исследование характеристик распределённых моделей цифровой электронной техники, построенных с использованием D-сетей Петри [Электронный ресурс] / А. В. Удалов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Том 7 № 1. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/76TVN115.pdf>.

4. Удалов, А. В. Разработка и оценка эффективности последовательно-параллельного алгоритма продвижения модельного времени имитационной распределённой модели цифровой электронной техники, построенной с использованием D-сетей Петри [Электронный ресурс] / А. В. Удалов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Том 7 № 2. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/58EVN215.pdf>.

Публикации в остальных изданиях

Всего 10 публикаций в материалах, трудах конференций на данную тематику, а также 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.