Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 004.4’242
ГРНТИ 20.01.01, 28.23.29
Инв. № 310275

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»**
Ректор ФГБОУ ВПО «СПбНИУ ИТМО» **_____/ В.Н. Васильев/** **М.П.**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 4 этапа Государственного контракта
№ 16.740.11.0455 от 13 мая 2011 г. и Дополнению от 25 октября 2011 г. № 1

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.
Проект: Разработка метода машинного обучения на основе алгоритмов решения задачи о выполнимости булевой формулы для построения управляющих конечных автоматов
Руководитель проекта: Шалыто Анатолий Абрамович

Санкт-Петербург
2012 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по Государственному контракту 16.740.11.0455 от 13 мая 2011 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

Руководитель темы:

доктор технических наук, профессор	А.А. Шалыто

Исполнители темы:

доктор технических наук, профессор	В.Г. Парфенов
кандидат технических наук, доцент	Г.А. Корнеев
кандидат технических наук, доцент	А.С. Станкевич
без ученой степени, без ученого звания	Ф.Н. Царев
без ученой степени, без ученого звания	М.В. Буздалов
без ученой степени, без ученого звания	В.И. Ульянцев

без ученой степени, без ученого звания — Д.С. Чивилихин

без ученой степени, без ученого звания — И.П. Бужинский

РЕФЕРАТ

Отчет 91 с., 1 ч., 7 рис., 1 табл., 20 источн., 3 прил.

Ключевые слова: задача о выполнимости булевой формулы, управляющие автоматы, КНФ-формула.

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 4 этапу Государственного контракта № 16.740.11.0455 «Разработка метода машинного обучения на основе алгоритмов решения задачи о выполнимости булевой формулы для построения управляющих конечных автоматов» (шифр «2011-1.2.1-113-002») от 13 мая 2011 по направлению «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук в области информатики» в рамках мероприятия 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук», мероприятия 1.2 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук», направления 1 «Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Цель работы – разработка метода машинного обучения на основе алгоритмов решения задачи о выполнимости булевой формулы для построения управляющих конечных автоматов

В Государственном контракте методы, использованные при выполнении отдельных видов работ (этапов), не предусмотрены.

При выполнении первого этапа НИР был использован следующий инструментарий:

1. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036527.

2. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036528.
3. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036529.
4. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036530.
5. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036531.
6. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036532.
7. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036533.
8. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036534.
9. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036535.
10. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036536.
11. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036537.
12. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036538.
13. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036539.
14. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036540.
15. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036541.
16. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036542.
17. Компьютер *Aquarius Elt E50 S46*. Инв. номер. 110104.7.0036543.

При выполнении патентных исследований и подготовке научно-технического отчета были использованы следующие нормативные документы:

- Постановление Правительства Российской Федерации от 4 мая 2005 г. № 284 «О государственном учете результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения»;
- Гражданский кодекс РФ;
- ГОСТ 7.32-2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления»;
- ГОСТ 15.101.98 «Система разработки и постановки продукции на

производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ».

В ходе исполнения обязательств по Государственному контракту № 16.740.11.0455 от 13 мая 2011 г. был создан научно-технический отчет, включающий выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы, план проведения экспериментальных исследований, подготовку заявки на регистрацию программы для ЭВМ, описание проведенных вычислительных экспериментов и анализ их результатов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕФЕРАТ 4
ОГЛАВЛЕНИЕ 7
ВВЕДЕНИЕ 9
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 14
1. ВЫБОР СТОРОННЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ВЫПОЛНИМОСТИ БУЛЕВОЙ ФОРМУЛЫ 14
1.1. Алгоритмы решения задачи о выполнимости булевой формулы 14
1.2. Соревнования среди программ для решения задачи о выполнимости булевой формулы 17
1.3. Выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы 20
1.3.1. Описание выбранных однопоточных программных средств 20
1.3.2. Описание выбранных многопоточных программных средств 21
1.3.3. Выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы 22
Выводы по главе 1 23
2. СОСТАВЛЕНИЕ ПЛАНА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 24
3. ПОДГОТОВКА ЗАЯВКИ НА РЕГИСТРАЦИЮ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ 26
4. ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ 27
5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ 28
5.1. Анализ результатов первого этапа вычислительных экспериментов 28

5.2. Анализ результатов второго этапа вычислительных экспериментов 29
Выводы по главе 5 34
6. ПОДГОТОВКА СТАТЬИ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК 35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 37
ПРИЛОЖЕНИЕ А. КОПИЯ СОПРОВОДИТЕЛЬНОГО ПИСЬМА ЗАЯВКИ НА РЕГИСТРАЦИЮ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ 39
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПРОТОКОЛЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ 40
ПРИЛОЖЕНИЕ В. КОПИЯ СПРАВКИ И ТЕКСТ СТАТЬИ 86
ВВЕДЕНИЕ 87
МУРАВЬИНЫЕ АЛГОРИТМЫ 87
УПРАВЛЯЮЩИЕ КОНЕЧНЫЕ АВТОМАТЫ 88
ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ НА ОСНОВЕ МУРАВЬИНЫХ АЛГОРИТМОВ 88
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 91
ЛИТЕРАТУРА 91

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем отчете излагаются результаты выполнения этапа 4 «Экспериментальное исследование разработанного метода машинного обучения» *поисковой научно-исследовательской работы по теме «Разработка метода машинного обучения на основе алгоритмов решения задачи о выполнимости булевой формулы для построения управляющих конечных автоматов»*, выполняемых в рамках государственного контракта, заключенного между Министерством образования и науки Российской Федерации и государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» в соответствии с решением Конкурсной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации № 1 (протокол от 25.03.2011 № 3/01731000037110000031) по лоту шифр «2011-1.2.1-113-002» «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук в области информатики» в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2008 года № 568 «О федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы».

Целями настоящего этапа являются:

1. Выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы.
2. Составление плана проведения экспериментальных исследований.
3. Подготовка заявки на регистрацию программы для ЭВМ.
4. Проведение вычислительных экспериментов.
5. Анализ результатов вычислительных экспериментов.
6. Подготовка статьи для публикации в журнале из перечня ВАК.

Выполнение работ настоящего этапа позволяет в дальнейшем разработать прототип инструментального средства, реализующего предложенный метод машинного обучения.

Отчет имеет следующую структуру. В первой главе проводится выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы. Описываются алгоритмы и основные сторонние средства решения задачи о выполнимости булевой формулы. Во второй главе приводится план проведения экспериментальных исследований.

В третьей главе приводится описание подготовленной заявки на регистрацию программы для ЭВМ. В четвертой главе приводится описание процесса проведения вычислительных экспериментов.

В пятой главе приводится анализ результатов вычислительных экспериментов. В шестой главе приводится описание подгоовленной статьи для публикации в журнале из перечня ВАК.

Основные главы снабжены выводами, кратко резюмирующими содержание главы. В заключении дается общая оценка работ по этапу.

Машинное обучение [2] – современный раздел информатики, посвященный созданию алгоритмов, которые обучают параметры некоторой модели на заранее подготовленных тестовых примерах, либо в процессе моделирования ее работы в некоторой внешней среде (обучение «на собственных ошибках»).

Задача о выполнимости булевой формулы – одна из задач, имеющих большое значение в информатике. Она состоит в том, чтобы по заданной булевой формуле найти такой набор значений входящих в нее переменных, что результат вычисления формулы – «истина». Эта задача относится к классу *NP*-полных задач, но для ее решения существует большое количество весьма эффективных на практике программных средств. Наиболее современные из этих программных средств, такие как *zChaff* [20],

MiniSat [12], *CryptoMiniSat* [10], *Plingeling* [7], способны обрабатывать формулы длиной в несколько миллионов символов, содержащие десятки и сотни тысяч переменных.

С использованием этих программных средств в настоящее время решаются такие задачи, как проверка эквивалентности формальных моделей программ, верификация моделей программ, формальная верификация микропроцессоров, генерация тестовых шаблонов, разводка печатных плат и т. д.

Автоматное программирование [3] – парадигма программирования, при использовании которой программу предлагается разрабатывать в виде совокупности автоматизированных объектов управления, каждый из которых содержит систему управления (взаимодействующие конечные автоматы) и объект управления.

Объект управления характеризуется множеством вычислительных состояний, а также двумя наборами функций: множеством предикатов, отображающих вычислительное состояние в логическое значение («истина» или «ложь»), и множеством действий, позволяющих изменять вычислительное состояние. Управляющий автомат определяется конечным множеством управляющих состояний, функцией переходов и функцией действий.

Исследования, проводимые в ряде университетов мира (например, в Стэнфордском университете), показывают, что модели, основанные на состояниях, целесообразно применять для построения систем со сложным поведением. Такие системы могут в ответ на одно и то же входное воздействие вырабатывать различные выходные воздействия в зависимости от предыстории работы.

Модели, основанные на состояниях, широко применяются в машинном обучении. Примером таких моделей являются Марковские цепи и скрытые Марковские модели [14]. Они могут применяться в таких задачах, как распознавание речи, и для них разработан ряд алгоритмов обучения. Область их применения ограничивается тем, что

эти модели имеют вероятностный характер. Наиболее близкими к ним моделями, имеющими детерминированный характер, являются конечные автоматы.

Важным достоинством автоматных программ является возможность их автоматической верификации [1], что является очень существенным свойством для систем с повышенными требованиями к надежности. Для этих систем важную роль играет влияние человеческого фактора на процесс разработки. Поэтому актуальной задачей является разработка методов машинного обучения для построения конечных автоматов.

Как правило, в машинном обучении конечные автоматы рассматриваются как распознаватели регулярных языков [4], или как преобразователи слов одного регулярного языка в слова другого. В случае построения управляющих автоматов обычно рассматриваются системы с малым числом входных переменных (одной или двумя), что существенно ограничивает область применения таких алгоритмов.

Кроме этого, большая часть существующих алгоритмов машинного обучения для конечных автоматов основана на принципе обучения «на собственных ошибках» и не являются достаточно эффективными для ряда задач, так как не позволяют эффективно учитывать знания человека. В свою очередь, алгоритмы, основанные на принципе обучения на примерах, обладают недостаточно высокой производительностью для использования на практике – они позволяют работать с автоматами, содержащими пять-десять состояний, а суммарная длина обучающих примеров может составлять не более двухсот-трехсот событий. Построение автомата с помощью существующих алгоритмов может занимать от нескольких минут до нескольких дней.

Для устранения недостатков существующих методов разрабатывается метод машинного обучения, основанный на решении задачи о выполнимости булевой формулы. В качестве входных данных этот метод будет использовать сценарии работы – один из типов обучающих примеров (тестов). Предварительные исследования

показывают, что новый метод будет демонстрировать существенно более высокую производительность и сможет строить автоматы с десятками состояний, а размер входных данных сможет составлять тысячи событий.

Изложенное позволяет утверждать, что результаты выполнения научно-исследовательской работы будут превышать мировой уровень разработок в рассматриваемой области.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В основной части отчета изложены результаты выполнения следующих работ:

1. Выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы.
2. Составление плана проведения экспериментальных исследований.
3. Подготовка заявки на регистрацию программы для ЭВМ.
4. Проведение вычислительных экспериментов.
5. Анализ результатов вычислительных экспериментов.
6. Подготовка статьи для публикации в журнале из перечня ВАК.

1. ВЫБОР СТОРОННЕЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ВЫПОЛНИМОСТИ БУЛЕВОЙ ФОРМУЛЫ

В настоящей главе проводится выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы. Описываюся основные алгоритмы решения задачи о выполнимости булевой формулы. Описываются проводимые соревнования среди программ для решения задачи о выполнимости булевой формулы. Затем производится выбор сторонних программ для проведения вычислительных экспериментов.

1.1. Алгоритмы решения задачи о выполнимости булевой формулы

Большинство программных средств для решения задачи о выполнимости булевой формулы основаны на алгоритме *DPLL* [11] и на его модернизированной версии – алгоритме *CDCL* [9]. Вкратце опишем данные алгоритмы.

DPLL – алгоритм Дэвиса–Патнема–Логемана–Лавленда, разработанный ими в 1962 году. За основу взят алгоритм поиска с возвратом.

Основной алгоритм с возвратом начинается с выбора переменной, присвоения ей значения «истина», упрощения формулы и затем рекурсивной проверки упрощенной

формулы на выполнимость. Если упрощенная формула выполнима, то исходная формула тоже выполнима. Иначе, процедура повторяется, но выбранной переменной задается значение «ложь». Этот подход называется «правилом разбиения», так как он разбивает задачу на две более простые подзадачи. Шаг упрощения заключается в том, что из формулы удаляются все дизъюнкты, которые становятся истинными после присвоения выбранной переменной значения «истина» и удаления из оставшихся дизъюнктов всех вхождений этой переменной, которые становятся ложными.

Алгоритм *DPLL* позволяет улучшить основной алгоритм с возвратом за счет использования следующих правил на каждом шаге.

Рассмотрим метод распространения переменной. Если дизъюнкт содержит ровно одну переменную, которой еще не задали значение, этот дизъюнкт может принять значение «истина» только в случае присвоения переменной значения, которое сделает ее истинной («истина», если переменная входит в дизъюнкт без отрицания, и «ложь», если переменная входит с отрицанием). Таким образом, на данном шаге не требуется делать выбор переменной. На практике за этим следует каскад присвоений переменным значений, таким образом, существенно сокращается количество вариантов перебора.

Рассмотрим метод исключения «чистых» переменных. Если некоторая переменная входит в дизъюнкты КНФ-формулы либо только без отрицаний, либо только с отрицаниями, она называется *чистой*. Чистым переменным всегда можно задать значение так, что все содержащие их дизъюнкты станут истинными. Таким образом, эти дизъюнкты не будут влиять на пространство вариантов, и их можно удалить.

Невыполнимость при данных конкретных значениях переменных определяется тем, что один из дизъюнктов становится *пустым*, то есть всем ее переменным задаются значения таким образом, что их вхождения (с отрицанием или без него) становятся

ложными. Выполнимость формулы констатируется тогда, когда или всем переменным заданы значения так, что не возникло пустых дизъюнктов, или если все дизъюнкты равны истине. Иллюстрация работы алгоритма *DPLL* приведена на рис. 1 (взята со страницы http://50-56-189-184.static.cloud-ips.com/wordpress/wp-content/uploads/2011/06/soos_summerschool.pdf).

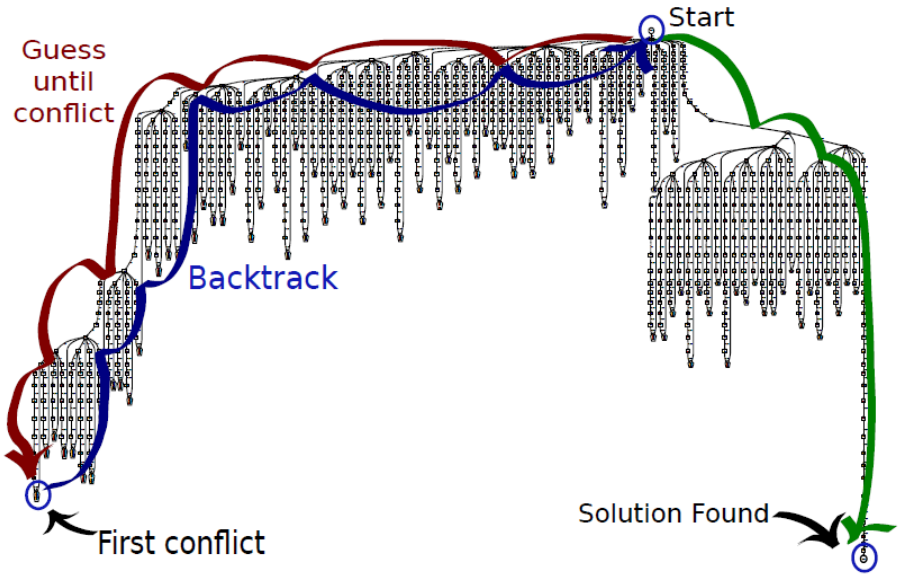

Рис. 1. Иллюстрация работы алгоритма *DPLL*

Алгоритм *CDCL* (*conflict-driven clause learning*), основанный на *DPLL*, может содержать следующие модификации, описание к которым в настоящем отчете не приводится:

- обучаемость новым дизъюнктам во время поиска с возвратом;
- использование структуры конфликтов во время обучения;
- использование ленивых структур данных для хранения формул;
- низкую, не более чем полиномиальную вычислительную сложность ветвящейся эвристики;
- использование периодического перезапуска алгоритма поиска с возвратом;
- другие оптимизации, специфичные для определенных приложений.

1.2. Соревнования среди программ для решения задачи о выполнимости булевой формулы

В последние годы был проведен ряд соревнований среди методов решения задачи о выполнимости булевой формулы [18]. Данные методы принимают на вход КНФ-формулу в формате *DIMACS* [17]. Опишем способы сравнения данных методов на соревнованиях.

В соревнованиях методы сравнивались и ранжировались отдельно на тестовых наборах трех типов тестов – булевых КНФ-формул:

- прикладные (*application*, *industrial*) – формулы, решения которых используются в прикладных задачах из областей верификации программного обеспечения, биоинформатики, планирования, теории расписаний;
- изготовленные (*crafted*, *handmade*, *hard combinatorial*) – специально подготовленные организаторами соревнований формулы;
- случайные (*random*) – случайным образом полученные формулы.

На рис. 2 (взят со страницы http://baldur.iti.uka.de/sat-race-2010/downloads.html) приведены характеристики 100 прикладных КНФ-формул, которые были использованы для сравнения программ решения задачи о выполнимости булевой формулы на соревновании *SAT Race 2010*.

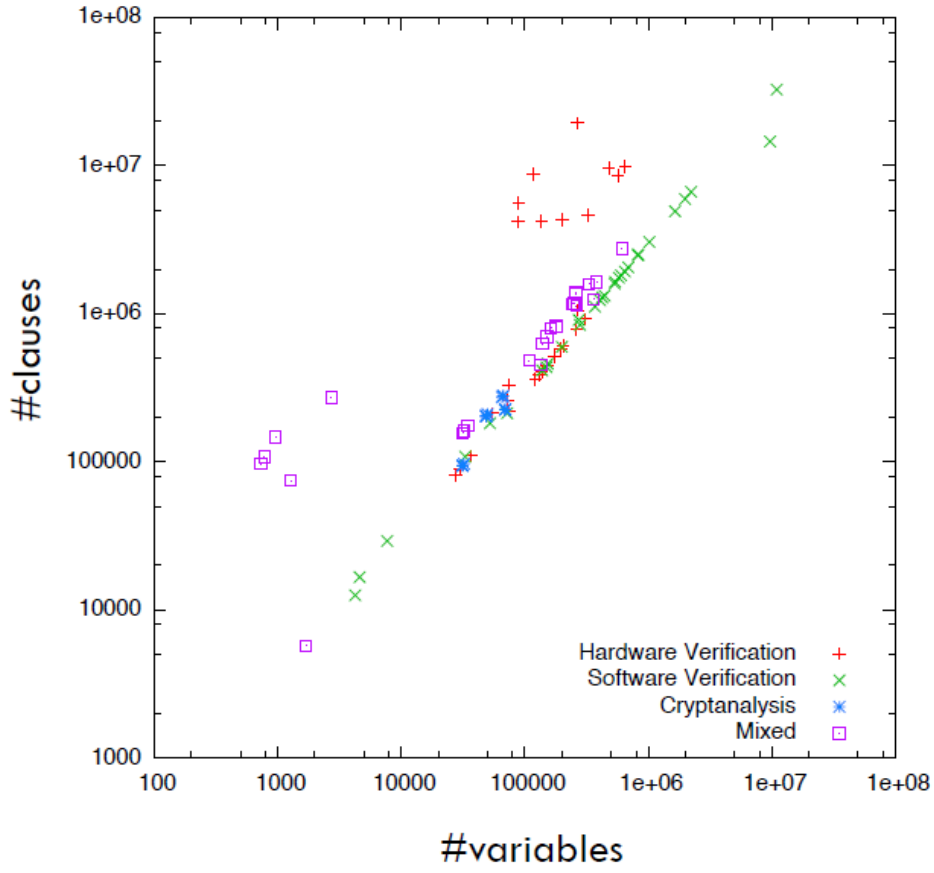

Рис. 2. Число переменных и дизъюнктов в КНФ-формулах, предложенных на соревновании *SAT Race 2010*

Также отдельно (для каждого типа набора тестов) методы решения задачи о выполнимости булевой формулы сравниваются в категориях «SAT+UNSAT», «SAT» и «UNSAT». Опишем смысл этих категорий:

- SAT – сравнение производится по числу решенных за отведенное время (обычно 15 или 30 минут процессорного времени) КНФ-формул;
- UNSAT – сравнение производится по числу КНФ-формул, для которых было верно предсказано отсутствие решения за отведенное время;
- SAT+UNSAT – сравнение методов производится по сумме верно решенных формул обозначенных типов.

Методы сортируются сначала по числу верно решенных формул, затем по среднему времени их решения. На рис. 3 (взят со страницы http://baldur.iti.uka.de/sat-race-2010/downloads.html) приведено сравнение программ на обозначенных КНФ-формулах.

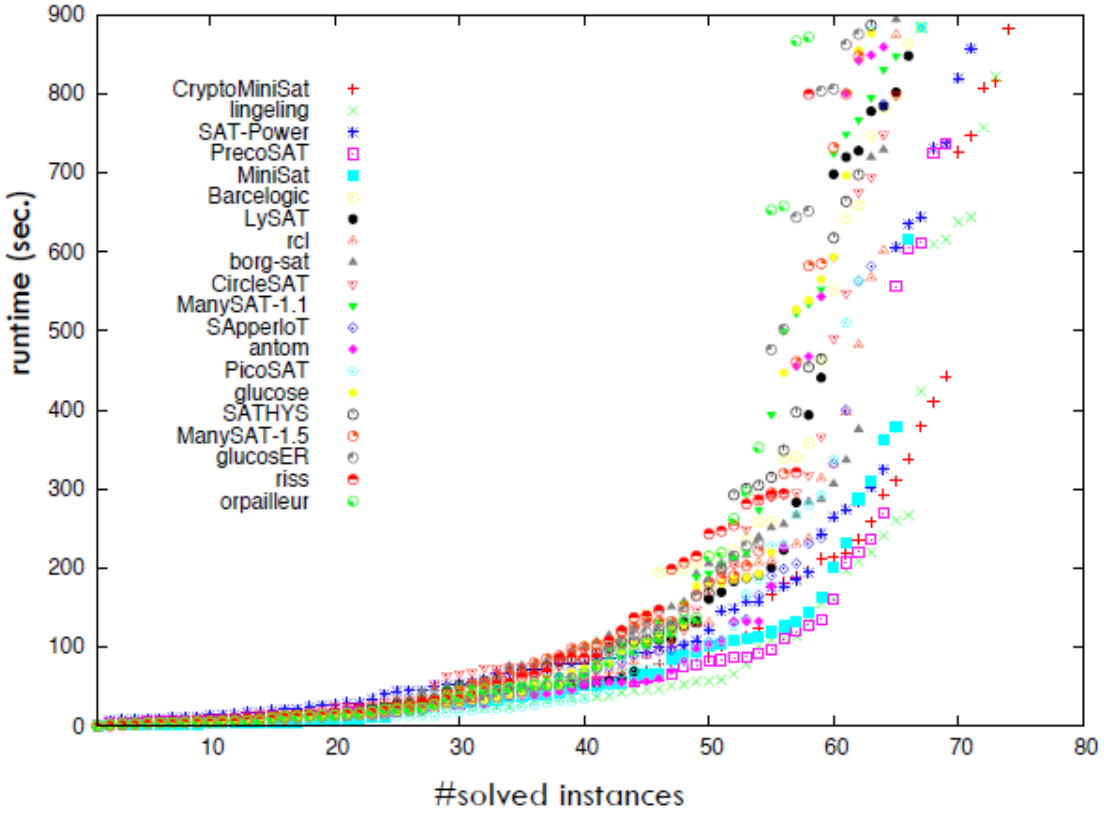

Рис. 3. Сравнение программ на соревновании *SAT Race 2010* по числу решенных КНФ-формул и времени работы

На последнем соревновании *SAT Challenge 2012* [16] также на обозначенных категориях тестов отдельно рассматривались и сравнивались методы с одним ядром решения (*Single-Engine*), с взаимодействующими ядрами решения (*Interacting Multi-Engine*), с невзаимодействующими несколькими ядрами решения (*Portfolio Approach*), работающие на нескольких процессорах (*Parallel*).

1.3. Выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы

В настоящем разделе проводится выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы. Описываются выбранные однопоточные и многопоточные программные средства.

1.3.1. Описание выбранных однопоточных программных средств

Приведем описание однопоточных программ для решения задачи о выполнимости булевой формулы, выбранных по результатам исследований обозначенных соревнований.

Glucose – основан на реализации *MiniSAT* 2006-го года [19]. В реализацию внесено небольшое число изменений, целью ставилась победа лишь в категории *UNSAT* соревнования *SAT Competition* 2009. Введено расстояние между блоками литералов (*LBD*), что показало крайне высокую эффективность на соревнованиях *SAT Competition 2009/2011* [18].

GlueMiniSAT использует алгоритм *CDCL*. К исходному алгоритму также добавлено *LBD*, но не исходная, а ограниченная версия – «прямой» *LBD*.

PrecoSAT – используется алгоритм *CDCL* с препроцессингом исходной формулы *BCE* (*blocked clause elimination*). Разрабатывался для 32-битной системы, что вызывает увеличение затрат по памяти на 64-битных системах.

Lingeling – основан на программе *PrecoSAT*. В отличие от предшественника в данном решении сделан упор на значительное уменьшение используемой оперативной памяти. Имеет свой сборщик мусора для уменьшения потребляемой памяти и общего прироста производительности. Разрабатывался с полной поддержкой 64-битных систем.

Clasp – в отличие от других решений, *Clasp* не основан на *CDCL*. Он построен по парадигме *ASP* (*answer set programming*). Главным отличием от других решений является отсутствие обучения «хорошим» дизъюнктам на этапе поиска с возвратом.

1.3.2. Описание выбранных многопоточных программных средств

Приведем описание многопоточных программ для решения задачи о выполнимости булевой формулы, выбранных по результатам исследований обозначенных соревнований.

Clasp MT – представляет собой многопоточную версию программы *Clasp*.

Plingeling – многопоточная версия *Lingeling*, реализована с использованием технологии *PTreads*. Поток-координатор поддерживает работу нескольких рабочих потоков. Данные потоки различаются лишь начальным случайным числом, которое задает последовательность, по которой описанный ранее алгоритм *DPLL* будет разбивать исходную формулу.

ManySAT – запускает в разных потоках различные модификации алгоритма *CDCL* на исходных данных. Как только какой-либо из потоков находит решение, выполнение оставшихся потоков прерывается.

QuteRSAT – основан на алгоритме *DPLL* без серьезных модификаций. Результаты исследований показывают, что немодифицированный алгоритм *DPLL* справляется с поставленными задачами гораздо хуже, чем модифицированный алгоритм *CDCL*.

Cryptominisat – создавался с целью исследования в области криптографического анализа. В отличие от большинства программных средств решений *Cryptominisat* не специализирован для решения узкого спектра задач. Распространяется по лицензии *LGPL*. Реализован на базе модернизированного алгоритма *CDCL*. Как и программное средство *Lingeling*, имеет свой сборщик мусора.

Ppfolio [15] – состоит из набора сторонних программных средств решения задачи о выполнимости булевой формулы. *Ppfolio* запускает в четырех потоках программные

средства *TNM, Clasp, Cryptominisat, March_hi*, а на всех оставшихся свободных ядрах запускается программа *Plingeling*.

1.3.3. Выбор сторонней программы для решения задачи о выполнимости булевой формулы

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны следующие однопоточные программные средства решения задачи о выполнимости булевой формулы:

1. *Lingeling*;
2. *Glueminisat*;
3. *Clasp*;
4. *Glucose*;
5. *PrecoSAT*.

Также использовались следующие многопоточные программные средства:

1. *Clasp MT*;
2. *CryptoMiniSAT*;
3. *Plingeling*;
4. *QuteRSAT*;
5. *Ppfolio*;
6. *ManySAT*.

Отдельное исследование будет проведено с использованием программного средства *CryptoMiniSAT*, так как имеется возможность использовать данное программное средство в операционной системе *Windows*.

Выводы по главе 1

1. Описаны основные алгоритмы решения задачи о выполнимости булевой формулы.
2. Описаны проводимые соревнования среди программ для решения задачи о выполнимости булевой формулы.
3. Произведен выбор сторонних программ для проведения вычислительных экспериментов и выбор основного программного средства *CryptoMiniSAT*.

2. СОСТАВЛЕНИЕ ПЛАНА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальное исследование будет проведено в два этапа. Сначала будет проведено экспериментальное исследование построения автоматов с 5, 10, 15 и 20 состояниями для входных данных (сценариев работы) различного размера – 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500 элементов сценариев суммарно. Данное исследование будет проведено с использованием программного средства *CryptoMiniSat* на персональном компьютере. Опишем дополнительные параметры первого экспериментального исследования:

- вероятность присутствия каждого из возможных переходов в искомом автомате равна 50%;
- число различных входных событий равно двум;
- число различных выходных воздействий равно двум;
- число переменных равно двум;
- наименьшее число выходных воздействий на переходе автомата равно одному;
- наибольшее число выходных воздействий на переходе автомата равно трем;
- на каждой комбинации числа состояний и размера входных данных помимо сочетаний (15, 250), (20, 250) и (20, 500) проводится 100 запусков;
- параметры командной строки: «`java -Xmx6G -Xss2G -jar`».

Второй этап экспериментальных исследований проводится для сравнения обозначенных однопоточных и параллельных средств решения задачи о выполнимости булевой формулы. В отличие от первого этапа будут исследованы задачи построения автоматов с б*о*льшим числом состояний, а суммарная длина сценариев работы для

фиксированного числа состояний искомого автомата варьироваться не будет. Опишем параметры данных экспериментальных исследований:

- размер искомого автомата варьируется от 20 до 30 состояний включительно;
- ограничение на время работы стороннего программного средства для решения одной задачи составляет 15 минут;
- суммарная длина сценариев работы в 110 раз больше числа состояний автомата для каждой задачи;
- длина каждого сценария не превышает 25;
- используется одна переменная (переходы искомого автомата помечены «*x*» или «!*x*»);
- для каждого программного средства и фиксированного числа состояний.

3. ПОДГОТОВКА ЗАЯВКИ НА РЕГИСТРАЦИЮ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

В процессе выполнения НИР подана заявка на регистрацию программы для ЭВМ «Программное средство для построения КНФ-формулы по графу совместимости вершин дерева сценариев работы программы». Копия сопроводительного письма заявки на регистрацию программы для ЭВМ приведена в приложении А.

Программа предназначена для автоматического построения КНФ-формулы по графу совместимости. Входными данными программы является граф совместимости дерева сценариев работы программы и ожидаемое число состояний соответствующего сценариям работы управляющего автомата. Выходными данными алгоритма является КНФ-формула в формате *DIMACS*.

4. ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первый этап экспериментальных исследований был проведен на компьютере с процессором *Intel Core* i5-2520M (2.5 GHz). На описанных входных данных программное средство *CryptoMiniSat* использовало до 3.5 гигабайт оперативной памяти для решения КНФ-формул, содержащих до 35 000 переменных и 9 000 000 дизъюнктов. Приложение Б содержит протоколы вычислительных экспериментов первого этапа.

Второй этап экспериментальных исследований проводился на сервере компании *Amazon* [6], предоставляющий облачный сервер с микропроцессорной архитектурой *Intel Xeon* и процессором, обладающим восьмью ядрами. Общая продолжительность второго этапа исследований составила 89 часов. В распоряжении выбранных программ находилось около 70 гигабайт памяти оперативного запоминающего устройства и восемь выделенных ядер процессоров *Intel Xeon* 5550.

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Настоящий раздел содержит анализ результатов вычислительных экспериментов.

5.1. Анализ результатов первого этапа вычислительных экспериментов

На рис. 4 приведен график, показывающий зависимость времени работы программного средства *CryptoMiniSat* от параметров входных данных. На графике для каждой комбинации числа состояний искомого автомата и суммарной длины сценариев работы приведено медианное значение среди 100 вычислительных экспериментов, протоколы которых приведены в приложении Б.

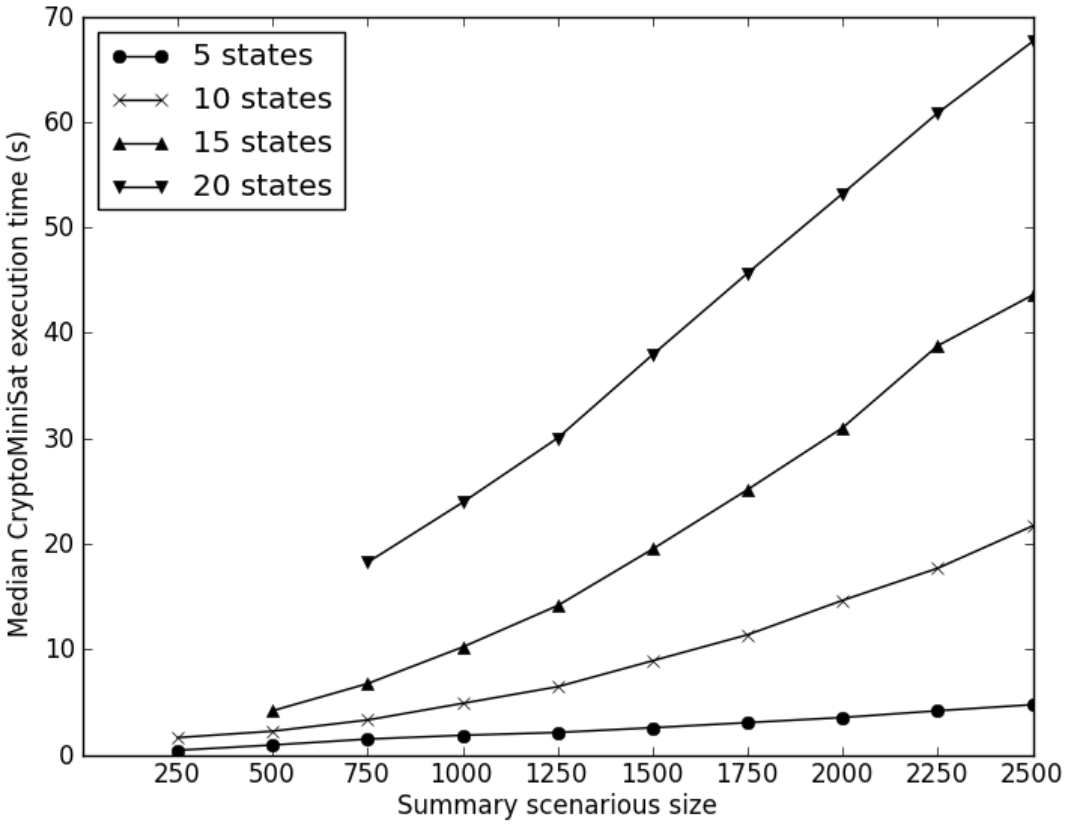

Рис. 4. Медианное время решения задачи в зависимости от параметров входных данных

Из приведенного графика видно, что предложенный алгоритм меньше чем за минуту работы персонального компьютера справляется с большинством предложенных задач построения управляющих автоматов. Генетический алгоритм, Из Из приведенного графика видно, что предложенный алгоритм меньше чем за минуту работы персонального компьютера справляется с большинством предложенных задач построения управляющих автоматов. Генетический алгоритм, предложенный в [4] для решения аналогичной задачи, на задачах построения управляющих автоматов с пятью состояниями показал бы на порядок меньшую производительность, а на задачах построения автоматов с большим числом состояний производительность генетического алгоритма неприемлимо низка.

Отметим, что на приведенных задачах (от 5 до 20 состояний искомого автомата) алгоритм, используя программное средство *CryptoMiniSat*, всегда находит решение.

5.2. Анализ результатов второго этапа вычислительных экспериментов

Основываясь на полученных результатах второго этапа вычислительных экспериментов можно сделать вывод, что многопоточные алгоритмы справляются с поставленными задачами гораздо лучше, чем их однопоточные аналоги. В табл. 1 приведены доли решенных задач для каждого сочетания программного средства и числа состояний искомого автомата.

Таблица 1. Доля успешных запусков программных средств на задачах построения управляющих автоматов с большим числом состояний

Число состояний	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Clasp MT	1	1	1	1	1	1	1	1	0,8	1	1
Cryptominisat	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Plingeling	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,7	0,5

QuteRSAT	1	1	1	1	1	1	0,6	0,7	1	0,5	0,9
Ppfolio	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ManySAT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Lingeling	1	0,9	1	0,8	1	1	0,7	0,9	0,9	0,3	0,3
GlueMiniSAT	1	1	1	1	1	1	0,7	0,9	0,8	0,9	0,3
Clasp	1	0,7	1	0,8	1	0,9	0,8	0,6	0,7	0,3	0,7
PrecoSAT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,8	1
Glucose	1	1	1	1	1	1	1	0,7	0,5	0,6	0,5

Проведем анализ не только части решенных задач, но и затраченного времени каждым из выбранных программных средств. На рис. 5 приведен график усредненного (по 10 запускам) времени работы шести многопоточных программных средств в зависимости от числа состояний искомого автомата (и, соответственно, размера входных данных). Маркеры исследований, в которых не были решены все 10 задач, обозначены заполненными фигурами.

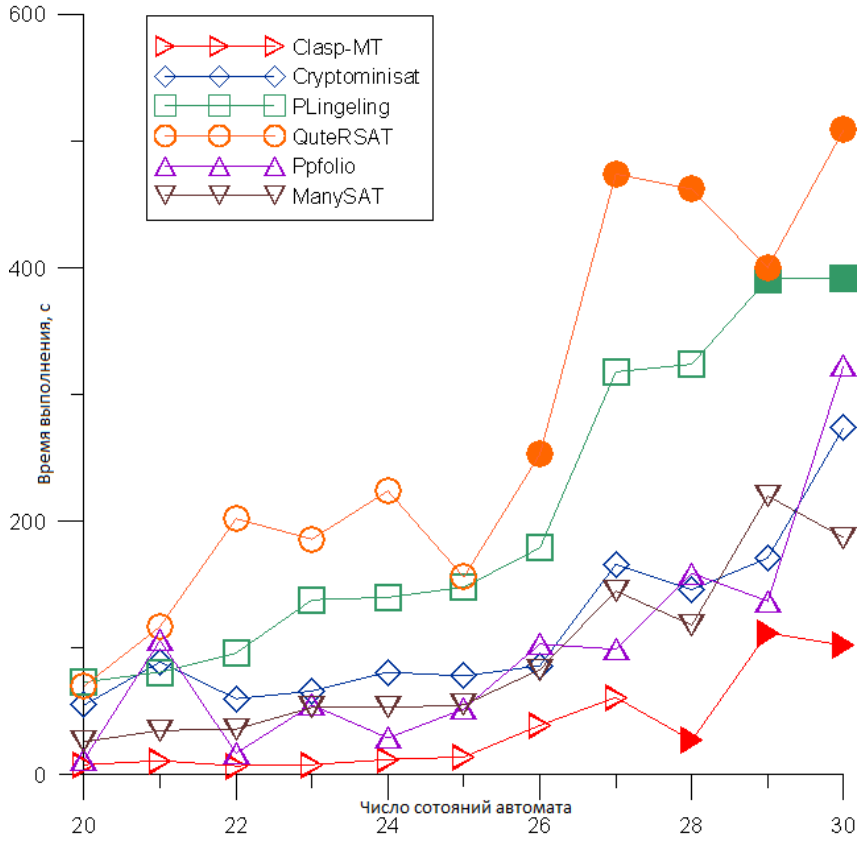

Рис. 5. Время работы многопоточных программных средств в зависимости от числа состояний искомого автомата

На рис. 6 приведен график усредненного (по 10 запускам) времени работы пяти однопоточных программных средств в зависимости от числа состояний искомого автомата (и, соответственно, размера входных данных).

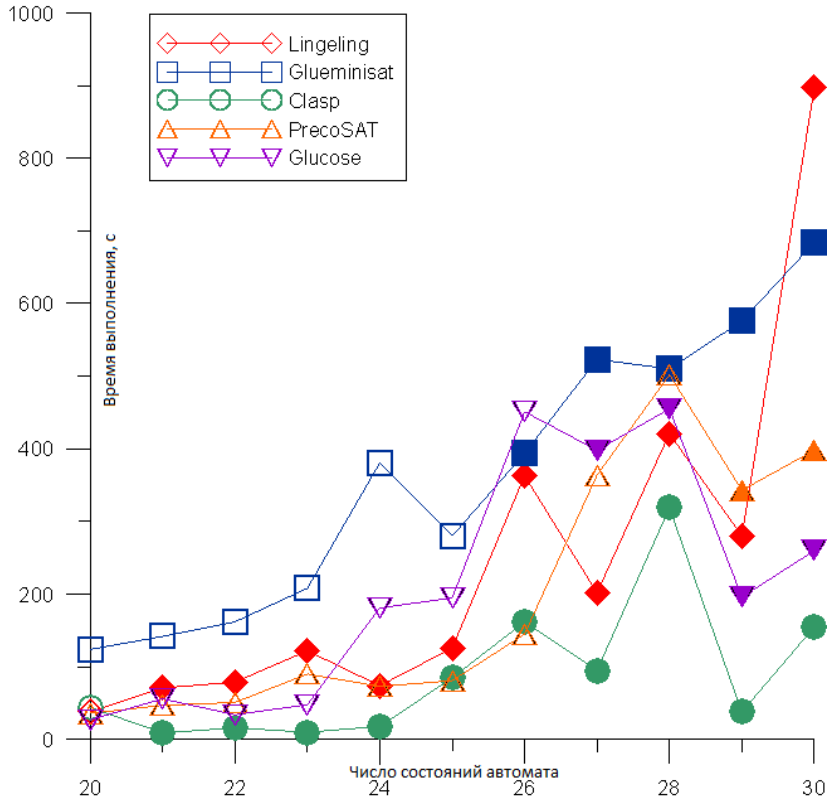

Рис. 6. Время работы однопоточных программных средств в зависимости от числа состояний искомого автомата

На приведенных графиках можно наблюдать, что в среднем время работы растет с увеличением числа состояний искомого автомата и суммарной длины сценариев работы, поданых на вход предложенному алгоритму. Однако, специфика задачи и программных средств такова, что предугадать время решения конкретной задачи затруднительно.

На рис. 7 представлены для сравнения однопоточные и многопоточные приложения, показавшие наилучшие результаты во время вычислительных экспериментов.

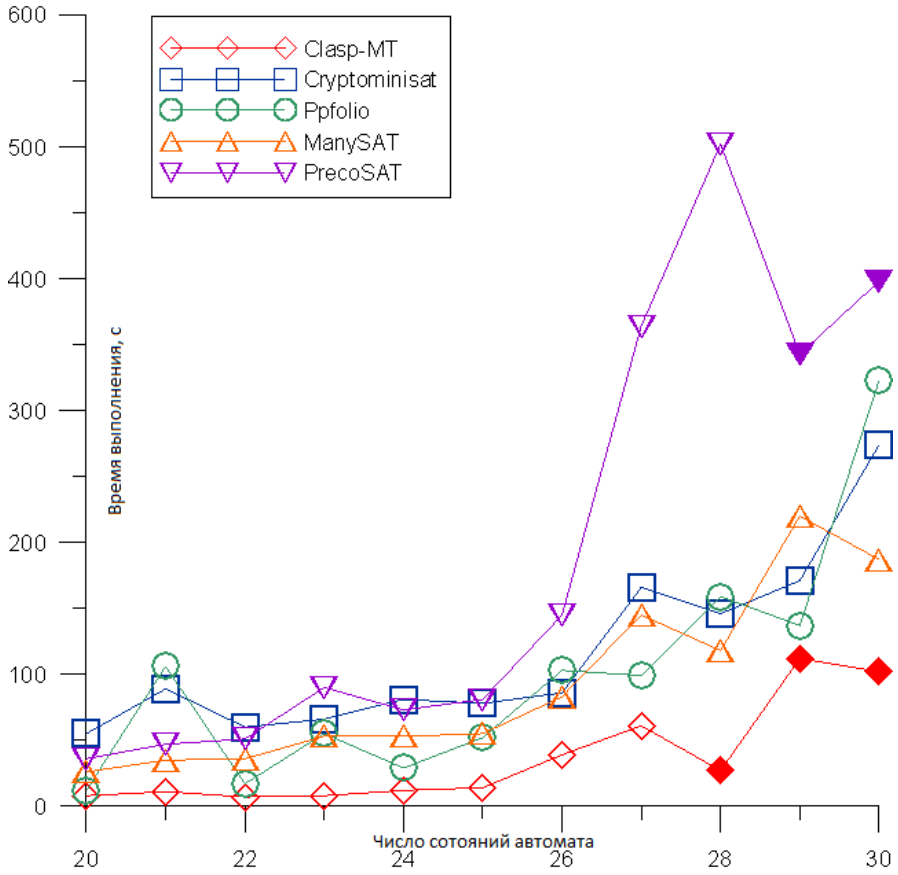

Рис. 7. Время работы лучших однопоточных и многопоточных программных средств в зависимости от числа состояний искомого автомата

Выводы по главе 5

1. Проведен анализ результатов первого этапа вычислительных экспериментов. Анализ показал, что программное средство *CryptoMiniSAT* успешно справляется с решением задач различной сложности. При этом число состояний искомого автомата варьировалось от 5 до 20.

2. Проведен анализ результатов второго этапа вычислительных экспериментов. Анализ показал, что программное средство *CryptoMiniSAT* наравне с некоторыми другими многопоточными программными средствами справляется с решением задач с бо́льшим числом состояний (от 20 до 30). Таким образом, экспериментальные исследования показали обоснованность выбора данного программного средства.

3. Предложенный метод машинного обучения показал производительность во много раз большую, чем существующие методы машинного обучения.

6. ПОДГОТОВКА СТАТЬИ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК

По результатам НИР в журнале «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики» 2012, № 6 будет опубликована статья. Копия справки и текст статьи приведены в приложении В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований на четвертом этапе работ по контракту были выполнены следующие работы:

- выбрана сторонняя программа для решения задачи о выполнимости булевой формулы;
- составлен план проведения экспериментальных исследований;
- подготовлена заявка на регистрацию программы для ЭВМ;
- проведены вычислительные эксперименты;
- проведен анализ результатов вычислительных экспериментов;
- подготовлена статья для публикации в журнале из перечня ВАК.

Таким образом, были решены все задачи четвертого этапа работ по контракту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кларк Э., Грамберг О., Пелед Д.* Верификация моделей программ. М.: МЦНМО, 2002.
2. *Николенко С. И., Тулупьев А. Л.* Самообучающиеся системы. М.: МЦНМО, 2009.
3. *Поликарпова Н. И., Шалыто А. А.* Автоматное программирование. СПб: Питер, 2009.
4. *Царев Ф. Н.* Метод построения управляющих конечных автоматов на основе тестовых примеров с помощью генетического программирования // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5, с. 31 – 36.
5. *Хопкрофт Дж., Мотвани Р., Ульман Дж.* Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Вильямс, 2002.
6. *Amazon Electronic Cloud Computing*. http://aws.amazon.com/ec2/.
7. *Biere A.* Lingeling, Plingeling, PicoSAT and PrecoSAT at SAT Race 2010. Technical Report 10/1. 2010. FMV Reports Series, Institute for Formal Models and Verification. Johannes Kepler University. Altenbergerstr. 69, 4040 Linz, Austria.
8. *Bouchard C.* Boolean Expression Solver. http://sourceforge.net/projects/bool-expr-solve/.
9. *Marques-Silva J., Lynce I., Malik S.* Conflict-Driven Clause Learning SAT Solvers // Handbook of Satisfiability Armin Biere, Marijn Heule, Hans van Maaren and Toby Walsh (Eds.). IOS Press, 2009.
10. *CryptoMiniSat* SAT-solver. http://www.msoos.org/cryptominisat2.
11. *Davis M., Logemann G., Loveland D.* A machine program for theorem-proving //Commun. ACM. 1962. 7, pp. 394-397. http://doi.acm.org/10.1145/368273.368557.
12. *Een N., Sörensson N.* An extensible SAT-solver. Chalmers University of Technology. Sweden, 2003. http://minisat.se/downloads/MiniSat.pdf.

13. *Presentation of SAT-Race* results at the SAT'10 conference http://baldur.iti.uka.de/sat-race-2010/downloads/SAT-Race-2010-Presentation.pdf.
14. *Rabiner L.* A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition //*Proceedings of the IEEE* . 1989. № 2, pp.257–286.
15. *Roussel O.* Description of ppfolio, 2011. http://www.cril.univ-artois.fr/roussel/ppfolio/solver1.pdf.
16. *SAT Challenge 2012*. http://baldur.iti.kit.edu/SAT-Challenge-2012/results.html.
17. *Satisfiability suggested format DIMACS*. http://www.domagoj-babic.com/uploads/ResearchProjects/Spear/dimacs-cnf.pdf.
18. *The international SAT Competitions web page*. http://www.satcompetition.org/.
19. *The MiniSAT page*. http://minisat.se/MiniSat.html.
20. *zChaff SAT-solver*. http://www.princeton.edu/~chaff/zchaff.html.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. КОПИЯ СОПРОВОДИТЕЛЬНОГО ПИСЬМА ЗАЯВКИ НА РЕГИСТРАЦИЮ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (НИУ ИТМО)

Кронверкский пр., д. 49,
г. Санкт-Петербург, 197101
Тел. (812) 232-97-04. Факс (812) 232-23-07
e-mail: od@mail.ifmo.ru
http://www.ifmo.ru

1.10.2012 № 83-05-2/196

В отдел регистрации программ для ЭВМ,
баз данных, топологий ИМС и передачи прав на них
Федерального государственного учреждения
«Федеральный институт промышленной собственности
Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам (ФГУ ФИПС)
Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва,
Г-59, ГСП-5, 123995

Направляю Вам на регистрацию программу для ЭВМ **Программное средство для построения КНФ-формулы по графу совместимости вершин дерева сценариев работы программы** правообладателем исключительного права на которую является федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт - Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Комплектность заявки указана в приложении.

Приложение:

1.Заявление (форма РП)	на	1	л.	в	1	экз.
2. Распечатка исходного текста программы	на	4	л.	в	1	экз.
3. Реферат	на	1	л.	в	1	экз.
4.Платежный документ об уплате госпошлины	на	1	л.	в	2	экз.

Всего на 7 листах + 1 платежный документ.
Свидетельство прошу выслать по почте

Проректор Никифоров В.О.

МП

«28» 09 2012 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПРОТОКОЛЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Протокол экспериментов № 1

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 250.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
1	0,374	51	0,452
2	0,405	52	0,421
3	0,421	53	0,421
4	0,343	54	0,593
5	0,593	55	0,374
6	0,452	56	0,359
7	0,437	57	0,359
8	0,53	58	0,405
9	0,422	59	0,343
10	0,468	60	0,421
11	0,39	61	0,359
12	0,39	62	0,375
13	0,39	63	0,405
14	0,468	64	0,437
15	0,468	65	0,546
16	0,406	66	0,514
17	0,39	67	0,39
18	0,39	68	0,405
19	0,484	69	0,531
20	0,468	70	0,39
21	0,374	71	0,484
22	0,359	72	0,499
23	0,515	73	0,358
24	0,546	74	0,484
25	0,39	75	0,795
26	0,437	76	0,764
27	0,374	77	0,452
28	0,515	78	0,561
29	0,468	79	0,468
30	0,39	80	0,436
31	0,39	81	0,468
32	0,453	82	0,64
33	0,406	83	0,624
34	0,421	84	0,484
35	0,483	85	0,499
36	0,375	86	0,421
37	0,624	87	0,406
38	0,39	88	0,421

39	0,406	89	0,468
40	0,468	90	0,312
41	0,405	91	0,296
42	0,437	92	0,39
43	0,421	93	0,359
44	0,453	94	0,484
45	0,437	95	0,499
46	0,374	96	0,515
47	0,374	97	0,468
48	0,437	98	0,499
49	0,437	99	0,343
50	0,359	100	0,375

Протокол экспериментов № 2

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
101	0,921	151	0,827
102	0,78	152	0,749
103	0,874	153	1,123
104	0,936	154	1,045
105	0,936	155	0,764
106	0,592	156	1,029
107	0,982	157	0,717
108	1,061	158	1,061
109	1,232	159	0,765
110	1,139	160	0,749
111	0,889	161	0,889
112	0,983	162	0,921
113	1,014	163	0,936
114	0,702	164	0,936
115	0,889	165	0,92
116	0,624	166	0,905
117	1,014	167	0,78
118	0,842	168	0,749
119	0,764	169	0,968
120	0,78	170	0,936
121	0,795	171	0,936
122	1,03	172	0,936
123	0,858	173	0,827
124	0,936	174	0,655
125	0,686	175	0,983
126	0,951	176	1,014
127	0,967	177	0,796

128	0,967	178	1,045
129	0,998	179	0,889
130	0,749	180	0,874
131	1,061	181	0,842
132	0,874	182	1,061
133	0,78	183	0,983
134	0,936	184	1,061
135	1,03	185	0,952
136	0,936	186	0,827
137	0,702	187	0,889
138	0,89	188	0,967
139	0,795	189	0,998
140	0,718	190	0,905
141	0,702	191	1,092
142	0,671	192	1,029
143	0,999	193	0,967
144	1,045	194	0,889
145	0,656	195	1,076
146	0,983	196	0,795
147	0,858	197	1,185
148	1,045	198	1,03
149	0,843	199	0,858
150	0,624	200	0,967

Протокол экспериментов № 3

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 750.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
201	1,373	251	1,404
202	1,716	252	1,56
203	1,684	253	1,404
204	1,763	254	1,092
205	1,529	255	1,638
206	1,466	256	1,513
207	1,435	257	1,389
208	1,81	258	1,233
209	1,014	259	1,731
210	1,654	260	1,138
211	1,435	261	1,341
212	1,311	262	1,451
213	1,545	263	1,311
214	1,7	264	1,872
215	1,606	265	1,607
216	1,966	266	1,794

217	1,248	267	1,653
218	1,67	268	1,217
219	1,357	269	1,451
220	1,311	270	0,967
221	1,794	271	1,544
222	1,56	272	1,388
223	1,623	273	1,887
224	1,498	274	1,498
225	1,653	275	1,591
226	1,529	276	1,623
227	0,92	277	1,591
228	1,903	278	1,56
229	1,42	279	1,685
230	1,857	280	1,514
231	1,388	281	1,981
232	1,529	282	1,358
233	1,513	283	1,482
234	1,966	284	1,294
235	1,264	285	1,326
236	1,404	286	1,404
237	1,279	287	1,638
238	1,498	288	0,999
239	1,56	289	1,7
240	1,529	290	1,373
241	1,576	291	1,56
242	1,857	292	1,856
243	1,372	293	1,373
244	1,528	294	1,497
245	1,17	295	2,028
246	1,576	296	1,513
247	1,482	297	1,576
248	1,31	298	1,513
249	1,544	299	1,95
250	1,732	300	1,591

Протокол экспериментов № 4

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 1000.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
301	1,591	351	2,074
302	1,794	352	1,934
303	1,934	353	1,872
304	1,763	354	2,121
305	1,544	355	1,669

306	1,528	356	1,857
307	1,888	357	1,81
308	1,778	358	1,763
309	1,762	359	1,435
310	1,887	360	1,903
311	1,966	361	1,919
312	2,09	362	2,044
313	2,169	363	1,701
314	1,623	364	1,763
315	1,84	365	1,841
316	2,044	366	2,308
317	1,778	367	2,153
318	1,841	368	2,059
319	1,981	369	1,591
320	2,137	370	1,872
321	1,7	371	1,841
322	1,435	372	1,841
323	1,935	373	1,981
324	1,7	374	1,856
325	1,732	375	1,934
326	1,107	376	1,903
327	2,06	377	2,153
328	1,779	378	1,747
329	1,56	379	1,295
330	1,732	380	1,966
331	1,482	381	1,794
332	1,872	382	1,872
333	1,826	383	1,669
334	2,199	384	1,669
335	2,043	385	1,95
336	2,169	386	2,012
337	1,778	387	1,763
338	1,779	388	1,997
339	1,779	389	1,607
340	1,856	390	1,825
341	1,748	391	1,778
342	1,965	392	1,498
343	1,373	393	1,716
344	1,81	394	1,779
345	2,044	395	1,934
346	1,825	396	1,935
347	1,607	397	1,84
348	1,748	398	1,856
349	1,778	399	1,857
350	1,716	400	2,122

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 1250.

Номер эксперимента	Время, с	Номер эксперимента	Время, с
401	2,449	451	2,091
402	2,043	452	1,872
403	1,731	453	2,075
404	2,496	454	2,262
405	1,981	455	1,747
406	2,262	456	2,091
407	2,106	457	2,34
408	2,621	458	2,215
409	2,199	459	2,247
410	2,059	460	2,059
411	1,887	461	2,465
412	2,73	462	2,2
413	2,979	463	1,747
414	1,841	464	2,137
415	1,95	465	1,95
416	2,699	466	1,904
417	1,779	467	1,997
418	2,2	468	1,794
419	1,872	469	2,169
420	1,747	470	2,184
421	1,872	471	2,153
422	1,856	472	1,903
423	2,153	473	1,857
424	2,028	474	2,418
425	2,152	475	2,06
426	2,637	476	1,903
427	2,028	477	2,012
428	1,965	478	2,465
429	1,872	479	1,809
430	1,826	480	2,028
431	1,794	481	1,779
432	2,044	482	2,637
433	2,34	483	1,888
434	1,669	484	1,888
435	2,059	485	2,23
436	1,778	486	2,09
437	2,012	487	2,168
438	1,965	488	2,028
439	2,013	489	2,137
440	2,761	490	2,137
441	2,106	491	1,997
442	2,262	492	2,199
443	2,652	493	2,449

444	1,95	494	2,121
445	1,935	495	1,857
446	1,934	496	2,371
447	1,981	497	1,934
448	1,966	498	2,106
449	1,794	499	1,982
450	1,856	500	2,168

Протокол экспериментов № 6

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 1500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
501	2,824	551	3,104
502	2,574	552	2,262
503	2,106	553	3,214
504	1,903	554	2,918
505	2,277	555	2,091
506	2,2	556	2,434
507	2,543	557	2,855
508	2,262	558	2,667
509	2,699	559	2,621
510	3,011	560	1,935
511	2,371	561	2,574
512	2,715	562	2,122
513	2,371	563	1,997
514	2,122	564	2,246
515	2,122	565	2,044
516	3,261	566	2,621
517	3,089	567	1,872
518	2,808	568	2,465
519	2,387	569	1,919
520	2,013	570	2,761
521	1,856	571	2,169
522	2,199	572	2,496
523	2,808	573	1,965
524	2,121	574	2,231
525	2,043	575	3,105
526	2,559	576	2,652
527	3,229	577	2,262
528	2,028	578	3,526
529	2,683	579	2,496
530	2,371	580	1,981
531	2,684	581	2,824
532	2,637	582	2,559

533	2,933	583	2,871
534	3,073	584	2,402
535	2,746	585	2,808
536	1,841	586	2,215
537	2,636	587	2,839
538	2,683	588	1,981
539	1,903	589	2,09
540	1,607	590	2,652
541	2,855	591	1,935
542	2,855	592	2,902
543	3,51	593	2,278
544	3,104	594	2,355
545	3,182	595	2,169
546	2,324	596	2,652
547	2,246	597	2,059
548	2,683	598	2,418
549	2,855	599	2,137
550	2,09	600	2,418

Протокол экспериментов № 7

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 1750.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
601	3,339	651	3,229
602	2,902	652	3,619
603	2,98	653	2,87
604	2,824	654	2,917
605	3,011	655	1,981
606	3,682	656	2,122
607	2,871	657	3,074
608	3,011	658	3,088
609	3,573	659	2,402
610	3,51	660	2,933
611	3,526	661	2,964
612	3,198	662	2,886
613	3,245	663	3,182
614	3,151	664	2,542
615	2,824	665	3,245
616	2,964	666	2,949
617	3,151	667	2,48
618	3,182	668	2,418
619	3,62	669	2,278
620	2,699	670	3,183
621	2,902	671	3,713

622	2,886	672	2,621
623	2,995	673	3,136
624	3,868	674	2,917
625	3,245	675	3,12
626	3,557	676	3,479
627	3,697	677	2,886
628	2,824	678	2,465
629	3,12	679	2,98
630	3,198	680	3,51
631	3,026	681	3,76
632	2,714	682	2,746
633	2,512	683	4,009
634	1,966	684	2,902
635	3,12	685	2,73
636	2,262	686	2,246
637	3,744	687	3,495
638	2,824	688	3,432
639	2,761	689	2,964
640	3,417	690	2,106
641	2,574	691	2,964
642	2,886	692	2,746
643	2,512	693	3,884
644	3,931	694	3,354
645	3,151	695	3,369
646	3,338	696	2,964
647	2,231	697	2,34
648	2,745	698	2,324
649	2,574	699	3,121
650	3,869	700	4,243

Протокол экспериментов № 8

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 2000.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
701	4,758	751	4,275
702	4,056	752	3,245
703	3,744	753	3,853
704	4,071	754	3,807
705	3,573	755	3,182
706	3,416	756	2,73
707	4,134	757	3,822
708	3,869	758	4,197
709	3,37	759	3,806
710	2,948	760	3,104

711	3,416	761	3,682
712	4,555	762	2,948
713	3,588	763	4,337
714	2,574	764	3,182
715	2,87	765	3,073
716	3,291	766	2,886
717	4,399	767	2,902
718	4,181	768	4,587
719	3,526	769	2,199
720	3,744	770	2,699
721	2,964	771	4,306
722	3,416	772	3,838
723	3,838	773	3,073
724	2,762	774	3,573
725	2,449	775	3,916
726	3,292	776	4,617
727	3,775	777	4,664
728	3,37	778	4,072
729	2,792	779	3,354
730	4,072	780	2,184
731	3,775	781	2,98
732	2,761	782	4,071
733	4,259	783	4,15
734	4,633	784	3,947
735	3,697	785	3,51
736	3,479	786	3,729
737	4,025	787	2,59
738	2,169	788	4,025
739	4,212	789	3,494
740	3,932	790	2,683
741	4,945	791	2,948
742	3,869	792	3,198
743	4,696	793	4,415
744	3,713	794	2,871
745	4,118	795	2,73
746	3,791	796	3,26
747	3,167	797	2,683
748	3,417	798	3,12
749	3,292	799	3,557
750	3,026	800	4,212

Протокол экспериментов № 9

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 2250.

Номер эксперимента	Время, с	Номер эксперимента	Время, с
801	5,694	851	4,212
802	4,15	852	5,6
803	5,522	853	4,415
804	3,978	854	3,432
805	5,975	855	2,777
806	3,416	856	3,276
807	5,46	857	5,008
808	4,134	858	5,398
809	4,508	859	3,105
810	3,744	860	4,04
811	5,367	861	3,994
812	5,226	862	4,758
813	5,226	863	4,165
814	3,932	864	4,478
815	3,854	865	4,384
816	4,04	866	3,244
817	3,354	867	3,681
818	3,37	868	5,008
819	4,524	869	4,056
820	2,481	870	4,118
821	3,916	871	3,183
822	3,838	872	3,432
823	4,025	873	3,26
824	2,87	874	4,774
825	5,616	875	5,117
826	2,98	876	3,432
827	5,133	877	4,259
828	3,12	878	4,149
829	2,917	879	4,275
830	4,165	880	2,98
831	4,602	881	3,244
832	3,276	882	4,243
833	4,571	883	2,917
834	5,008	884	5,304
835	4,353	885	4,899
836	3,978	886	5,367
837	4,617	887	2,87
838	4,54	888	5,569
839	3,308	889	5,148
840	5,023	890	3,541
841	4,493	891	3,744
842	5,195	892	4,805
843	3,915	893	5,647
844	3,276	894	4,399
845	4,165	895	3,744
846	4,664	896	3,37

847	4,82	897	4,087
848	3,401	898	3,214
849	3,463	899	4,353
850	5,086	900	3,307

Протокол экспериментов № 10

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 5; суммарная длина сценариев работы – 2500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
901	3,775	951	6,146
902	5,631	952	4,618
903	4,992	953	6,037
904	5,242	954	6,661
905	5,554	955	6,006
906	6,037	956	4,478
907	3,853	957	3,931
908	6,911	958	5,507
909	3,198	959	3,837
910	6,255	960	4,618
911	5,585	961	3,76
912	4,321	962	5,631
913	5,912	963	4,196
914	5,694	964	4,009
915	3,697	965	5,148
916	3,775	966	4,493
917	2,793	967	3,759
918	5,585	968	4,212
919	3,822	969	4,274
920	6,24	970	5,273
921	6,115	971	6,271
922	3,916	972	3,822
923	5,289	973	3,494
924	3,26	974	5,319
925	3,619	975	3,51
926	4,649	976	4,01
927	4,508	977	6,006
928	4,727	978	6,271
929	5,429	979	3,151
930	5,741	980	3,682
931	5,039	981	3,697
932	3,432	982	6,224
933	5,101	983	3,51
934	6,443	984	5,507
935	5,897	985	5,741

936	5,226	986	4,555
937	4,181	987	4,212
938	4,258	988	6,318
939	3,291	989	5,772
940	5,398	990	6,24
941	4,119	991	4,509
942	5,023	992	4,492
943	5,569	993	3,557
944	4,134	994	3,791
945	3,557	995	5,616
946	3,261	996	6,599
947	4,321	997	5,398
948	5,491	998	4,353
949	3,978	999	5,491
950	5,273	1000	4,555

Протокол экспериментов № 11

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 250.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
1001	1,56	1051	1,576
1002	1,513	1052	1,498
1003	1,42	1053	1,498
1004	1,919	1054	1,575
1005	1,045	1055	1,841
1006	1,576	1056	1,794
1007	1,45	1057	1,653
1008	1,575	1058	1,778
1009	1,762	1059	1,326
1010	1,311	1060	2,355
1011	1,7	1061	1,232
1012	1,592	1062	1,607
1013	1,638	1063	1,825
1014	1,56	1064	1,607
1015	1,778	1065	1,778
1016	1,451	1066	2,871
1017	1,373	1067	1,638
1018	1,857	1068	1,45
1019	1,264	1069	1,482
1020	1,622	1070	1,794
1021	1,56	1071	1,701
1022	1,763	1072	1,373
1023	1,685	1073	1,794
1024	1,778	1074	1,513

1025	1,684	1075	1,607
1026	1,513	1076	1,622
1027	1,716	1077	1,95
1028	1,358	1078	1,622
1029	2,372	1079	1,716
1030	1,934	1080	1,56
1031	1,591	1081	1,529
1032	1,373	1082	1,279
1033	1,575	1083	1,607
1034	1,747	1084	1,622
1035	1,904	1085	1,747
1036	1,638	1086	1,778
1037	1,622	1087	1,623
1038	1,67	1088	1,482
1039	1,638	1089	1,498
1040	1,918	1090	1,42
1041	1,466	1091	1,217
1042	1,669	1092	1,435
1043	1,31	1093	1,81
1044	1,701	1094	1,56
1045	1,856	1095	1,545
1046	1,482	1096	1,482
1047	1,467	1097	1,981
1048	1,716	1098	1,622
1049	1,778	1099	1,841
1050	1,404	1100	1,575

Протокол экспериментов № 12

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
1101	2,028	1151	2,043
1102	2,293	1152	2,481
1103	2,683	1153	1,997
1104	2,106	1154	2,309
1105	2,371	1155	2,324
1106	2,2	1156	2,028
1107	2,309	1157	1,996
1108	2,06	1158	2,2
1109	2,23	1159	2,449
1110	2,34	1160	2,075
1111	1,997	1161	2,169
1112	2,247	1162	2,355
1113	2,121	1163	2,387

1114	2,34	1164	2,324
1115	2,184	1165	2,262
1116	2,496	1166	2,324
1117	2,246	1167	2,387
1118	2,184	1168	2,137
1119	2,418	1169	2,387
1120	2,402	1170	2,184
1121	1,966	1171	1,997
1122	2,387	1172	1,919
1123	2,216	1173	2,73
1124	1,996	1174	2,231
1125	2,106	1175	2,262
1126	2,122	1176	2,137
1127	1,965	1177	2,059
1128	2,2	1178	2,184
1129	2,309	1179	2,34
1130	2,278	1180	2,293
1131	2,09	1181	2,246
1132	2,106	1182	2,355
1133	2,371	1183	2,605
1134	2,153	1184	2,091
1135	2,184	1185	2,168
1136	2,184	1186	2,309
1137	2,511	1187	2,418
1138	2,293	1188	2,137
1139	2,168	1189	2,215
1140	2,028	1190	2,153
1141	2,231	1191	2,325
1142	2,231	1192	2,574
1143	2,215	1193	2,262
1144	2,231	1194	2,199
1145	2,356	1195	2,028
1146	2,262	1196	2,106
1147	2,683	1197	2,324
1148	2,199	1198	2,371
1149	2,106	1199	2,153
1150	2,106	1200	2,402

Протокол экспериментов № 13

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 750.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
1201	4,602	1251	3,089
1202	3,354	1252	3,463

1203	3,307	1253	2,496
1204	3,556	1254	3,494
1205	3,026	1255	3,089
1206	3,775	1256	3,338
1207	3,261	1257	3,198
1208	3,479	1258	3,619
1209	2,917	1259	2,793
1210	3,432	1260	2,979
1211	2,98	1261	3,12
1212	3,354	1262	3,26
1213	3,494	1263	3,338
1214	3,51	1264	3,26
1215	3,354	1265	3,151
1216	3,198	1266	3,401
1217	4,259	1267	3,307
1218	3,089	1268	3,23
1219	3,744	1269	3,681
1220	3,308	1270	3,229
1221	2,746	1271	3,681
1222	3,401	1272	3,042
1223	3,354	1273	3,229
1224	3,479	1274	3,494
1225	3,167	1275	3,978
1226	3,728	1276	3,198
1227	3,136	1277	2,855
1228	2,995	1278	3,323
1229	3,12	1279	3,432
1230	3,12	1280	3,604
1231	3,744	1281	3,681
1232	3,229	1282	2,839
1233	2,933	1283	3,089
1234	3,37	1284	3,432
1235	3,026	1285	3,494
1236	3,261	1286	3,276
1237	3,697	1287	3,385
1238	3,369	1288	3,214
1239	3,806	1289	3,291
1240	2,808	1290	3,026
1241	3,245	1291	3,245
1242	3,276	1292	3,448
1243	3,775	1293	3,463
1244	2,918	1294	3,448
1245	3,276	1295	3,198
1246	3,136	1296	3,869
1247	3,619	1297	2,512
1248	3,697	1298	3,338
1249	3,167	1299	3,12
1250	3,386	1300	3,338

Протокол экспериментов № 14

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 1000.

Номер эксперимента	Время, с	Номер эксперимента	Время, с
1301	4,961	1351	4,945
1302	4,929	1352	5,117
1303	3,697	1353	4,118
1304	5,023	1354	4,961
1305	4,82	1355	3,978
1306	4,914	1356	5,055
1307	3,978	1357	5,32
1308	3,947	1358	4,056
1309	3,916	1359	4,571
1310	5,163	1360	5,023
1311	5,023	1361	4,883
1312	5,538	1362	4,867
1313	5,226	1363	5,273
1314	5,085	1364	5,943
1315	5,257	1365	5,35
1316	4,15	1366	4,696
1317	4,431	1367	5,616
1318	5,881	1368	5,133
1319	5,32	1369	4,509
1320	5,085	1370	6,63
1321	5,304	1371	6,053
1322	3,822	1372	4,087
1323	5,32	1373	4,852
1324	5,585	1374	4,758
1325	5,616	1375	3,915
1326	7,956	1376	4,384
1327	5,912	1377	4,493
1328	4,166	1378	3,884
1329	4,446	1379	4,524
1330	5,319	1380	4,493
1331	5,288	1381	7,301
1332	4,618	1382	4,602
1333	5,772	1383	5,57
1334	4,774	1384	4,181
1335	4,228	1385	4,119
1336	5,491	1386	5,772
1337	3,791	1387	4,244
1338	4,508	1388	5,475
1339	4,555	1389	4,946

1340	4,29	1390	4,571
1341	5,117	1391	5,803
1342	4,992	1392	4,29
1343	4,149	1393	5,195
1344	4,789	1394	4,68
1345	5,288	1395	4,415
1346	4,79	1396	4,758
1347	4,774	1397	4,555
1348	5,507	1398	4,633
1349	5,007	1399	5,444
1350	4,914	1400	4,54

Протокол экспериментов № 15

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 1250.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
1401	6,053	1451	5,694
1402	6,474	1452	6,318
1403	6,411	1453	5,413
1404	6,474	1454	7,878
1405	6,942	1455	6,396
1406	6,24	1456	5,896
1407	6,552	1457	7,395
1408	6,552	1458	5,616
1409	6,786	1459	6,396
1410	5,444	1460	8,159
1411	6,77	1461	6,427
1412	6,818	1462	7,909
1413	6,895	1463	6,256
1414	5,741	1464	5,662
1415	8,034	1465	6,303
1416	5,959	1466	6,849
1417	6,084	1467	6,146
1418	7,8	1468	5,07
1419	6,193	1469	7,363
1420	6,287	1470	6,958
1421	7,41	1471	5,897
1422	7,114	1472	6,038
1423	6,474	1473	6,568
1424	6,848	1474	8,066
1425	6,318	1475	9,251
1426	6,521	1476	6,411
1427	6,053	1477	7,269
1428	4,743	1478	6,864

1429	6,645	1479	6,598
1430	8,003	1480	6,474
1431	5,959	1481	5,632
1432	6,303	1482	6,256
1433	6,537	1483	6,801
1434	6,801	1484	8,299
1435	6,365	1485	6,021
1436	6,708	1486	5,912
1437	5,897	1487	6,162
1438	5,195	1488	6,786
1439	5,881	1489	6,443
1440	7,956	1490	7,925
1441	7,16	1491	5,757
1442	6,661	1492	6,35
1443	12,652	1493	5,694
1444	6,755	1494	5,086
1445	6,458	1495	6,646
1446	7,503	1496	5,943
1447	6,209	1497	5,975
1448	6,895	1498	7,535
1449	6,832	1499	6,333
1450	7,379	1500	7,207

Протокол экспериментов № 16

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 1500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
1501	10,031	1551	8,019
1502	10,748	1552	8,876
1503	9,89	1553	9,672
1504	9,844	1554	7,831
1505	10,374	1555	9,47
1506	9,891	1556	7,863
1507	10,062	1557	9,812
1508	8,783	1558	8,783
1509	9,672	1559	6,662
1510	8,253	1560	6,599
1511	9,048	1561	8,455
1512	9,36	1562	10,608
1513	6,661	1563	10,421
1514	8,721	1564	8,252
1515	7,909	1565	10,156
1516	8,721	1566	8,658
1517	8,768	1567	6,068

1518	10	1568	7,535
1519	8,783	1569	9,687
1520	10,795	1570	8,44
1521	9,422	1571	11,404
1522	8,876	1572	7,878
1523	10,109	1573	9,594
1524	7,738	1574	7,021
1525	8,595	1575	8,112
1526	9,531	1576	10,484
1527	9,235	1577	8,814
1528	11,965	1578	8,315
1529	9,079	1579	10,233
1530	7,613	1580	10,748
1531	8,112	1581	9,516
1532	9,797	1582	7,613
1533	10,094	1583	8,845
1534	9,11	1584	7,114
1535	7,909	1585	10,218
1536	9,875	1586	9,812
1537	8,518	1587	8,393
1538	9,874	1588	8,845
1539	8,705	1589	9,453
1540	8,097	1590	8,658
1541	11,997	1591	9,921
1542	9,204	1592	11,497
1543	8,97	1593	10,873
1544	7,035	1594	7,161
1545	9,11	1595	8,782
1546	10,545	1596	9,844
1547	8,658	1597	8,393
1548	9,578	1598	8,393
1549	8,268	1599	9,531
1550	8,876	1600	9,048

Протокол экспериментов № 17

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 1750.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
1601	12,027	1651	11,684
1602	12,621	1652	11,341
1603	10,203	1653	10,764
1604	12,027	1654	10,156
1605	12,277	1655	12,465
1606	12,324	1656	12,933

1607	11,949	1657	12,106
1608	8,751	1658	11,31
1609	9,969	1659	12,324
1610	13,509	1660	9,625
1611	8,658	1661	12,106
1612	12,199	1662	14,851
1613	10,03	1663	10,608
1614	9,999	1664	13,291
1615	9,625	1665	11,014
1616	9,266	1666	11,872
1617	13,323	1667	8,782
1618	10,998	1668	11,747
1619	9,017	1669	14,882
1620	8,876	1670	12,324
1621	12,792	1671	10,046
1622	11,451	1672	14,212
1623	8,736	1673	14,071
1624	9,095	1674	11,934
1625	11,793	1675	11,684
1626	10,608	1676	9,641
1627	9,984	1677	12,34
1628	10,655	1678	11,747
1629	11,045	1679	11,341
1630	10,483	1680	11,481
1631	12,215	1681	10,28
1632	9,734	1682	11,887
1633	10,904	1683	11,435
1634	10,14	1684	10,639
1635	11,138	1685	11,466
1636	10,483	1686	10,342
1637	13,292	1687	13,526
1638	13,682	1688	14,508
1639	12,012	1689	10,952
1640	12,573	1690	14,539
1641	11,497	1691	12,152
1642	11,903	1692	14,29
1643	10,265	1693	14,227
1644	11,56	1694	11,7
1645	11,918	1695	10,437
1646	10,732	1696	13,775
1647	12,122	1697	18,205
1648	11,279	1698	15,288
1649	7,722	1699	16,068
1650	12,402	1700	11,84

Протокол экспериментов № 18

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 2000.

Номер эксперимента	Время, с	Номер эксперимента	Время, с
1701	11,575	1751	14,789
1702	17,253	1752	12,636
1703	12,636	1753	14,196
1704	17,316	1754	8,721
1705	14,727	1755	14,399
1706	14,93	1756	16,317
1707	14,259	1757	14,68
1708	12,761	1758	16,161
1709	14,04	1759	16,568
1710	16,053	1760	12,574
1711	17,675	1761	18,189
1712	11,373	1762	12,308
1713	14,555	1763	12,261
1714	17,768	1764	14,57
1715	16,224	1765	14,227
1716	15,897	1766	17,301
1717	15,975	1767	11,31
1718	15,444	1768	12,963
1719	16,38	1769	15,523
1720	14,726	1770	16,099
1721	15,724	1771	17,425
1722	13,853	1772	14,586
1723	15,444	1773	14,149
1724	15,475	1774	19,641
1725	14,789	1775	14,009
1726	13,447	1776	9,141
1727	15,116	1777	14,492
1728	12,34	1778	16,146
1729	14,383	1779	15,35
1730	16,52	1780	12,964
1731	11,529	1781	13,089
1732	13,681	1782	12,698
1733	17,036	1783	14,414
1734	15,709	1784	13,852
1735	12,355	1785	14,82
1736	12,48	1786	15,959
1737	15,771	1787	13,214
1738	18,86	1788	14,851
1739	11,856	1789	14,867
1740	14,524	1790	11,871
1741	14,462	1791	11,7
1742	16,412	1792	14,165
1743	15,772	1793	11,466

1744	19,547	1794	20,842
1745	14,601	1795	13,635
1746	11,56	1796	12,433
1747	13,946	1797	13,697
1748	14,258	1798	14,133
1749	15,569	1799	16,614
1750	15,116	1800	12,761

Протокол экспериментов № 19

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 2250.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
1801	16,677	1851	15,132
1802	22,215	1852	16,598
1803	17,004	1853	15,085
1804	18,611	1854	17,191
1805	20,498	1855	17,082
1806	19,454	1856	19,656
1807	12,262	1857	18,018
1808	22,261	1858	19,016
1809	15,023	1859	16,208
1810	18,034	1860	19,702
1811	20,389	1861	19,562
1812	16,052	1862	17,597
1813	15,741	1863	19,141
1814	15,35	1864	18,142
1815	17,004	1865	19,89
1816	23,696	1866	17,035
1817	19,391	1867	23,9
1818	19,952	1868	15,944
1819	23,727	1869	14,461
1820	18,299	1870	26,972
1821	17,269	1871	21,824
1822	23,525	1872	20,998
1823	16,754	1873	17,971
1824	15,834	1874	20,655
1825	22,683	1875	19,765
1826	18,174	1876	17,55
1827	14,617	1877	18,752
1828	17,503	1878	16,115
1829	19,999	1879	21,356
1830	16,583	1880	13,307
1831	19,609	1881	20,639
1832	16,911	1882	19,048

1833	16,738	1883	17,487
1834	17,721	1884	16,848
1835	21,216	1885	16,77
1836	16,739	1886	12,698
1837	13,291	1887	11,7
1838	27,753	1888	21,247
1839	21,824	1889	16,817
1840	16,911	1890	21,856
1841	18,205	1891	16,208
1842	20,124	1892	14,789
1843	19,64	1893	18,049
1844	26,301	1894	18,065
1845	17,27	1895	16,068
1846	16,536	1896	19,234
1847	22,245	1897	17,8
1848	11,17	1898	20,982
1849	18,159	1899	23,868
1850	15,49	1900	22,838

Протокол экспериментов № 20

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 10; суммарная длина сценариев работы – 2500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
1901	25,584	1951	24,258
1902	21,684	1952	27,596
1903	26,239	1953	19,999
1904	24,336	1954	19,359
1905	26,458	1955	20,827
1906	26,926	1956	17,784
1907	22,277	1957	22,776
1908	25,023	1958	19,797
1909	19,063	1959	15,865
1910	26,972	1960	25,943
1911	21,419	1961	21,809
1912	20,405	1962	25,085
1913	21,247	1963	17,207
1914	16,802	1964	21,294
1915	20,452	1965	20,53
1916	19,5	1966	28,22
1917	18,782	1967	25,147
1918	20,14	1968	21,122
1919	21,247	1969	20,124
1920	23,868	1970	20,592
1921	20,53	1971	23,104

1922	22,791	1972	17,706
1923	22,292	1973	25,178
1924	22,417	1974	15,303
1925	16,13	1975	21,435
1926	28,283	1976	21,357
1927	22,636	1977	18,127
1928	18,642	1978	24,804
1929	25,194	1979	19,391
1930	17,737	1980	20,139
1931	23,946	1981	19,017
1932	16,942	1982	23,259
1933	19,313	1983	21,17
1934	15,382	1984	21,809
1935	24,804	1985	24,727
1936	23,681	1986	21,091
1937	25,99	1987	12,901
1938	16,645	1988	25,085
1939	20,608	1989	16,567
1940	23,042	1990	24,945
1941	24,788	1991	18,299
1942	21,825	1992	21,309
1943	23,977	1993	25,101
1944	22,37	1994	25,116
1945	24,398	1995	23,525
1946	24,82	1996	16,723
1947	16,037	1997	18,142
1948	27,16	1998	23,135
1949	21,949	1999	19,126
1950	25,568	2000	20,514

Протокол экспериментов № 21

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 15; суммарная длина сценариев работы – 500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
2001	3,869	2051	17,722
2002	4,166	2052	3,214
2003	4,4	2053	11,372
2004	4,072	2054	4,056
2005	5,132	2055	5,164
2006	3,978	2056	3,9
2007	4,602	2057	4,711
2008	3,775	2058	3,775
2009	3,822	2059	3,619
2010	4,696	2060	3,994

2011	5,039	2061	3,448
2012	29,265	2062	117,016
2013	7,644	2063	3,729
2014	27,253	2064	5,803
2015	4,228	2065	3,713
2016	5,273	2066	27,394
2017	3,822	2067	3,572
2018	3,759	2068	3,401
2019	3,525	2069	4,368
2020	3,541	2070	3,713
2021	3,931	2071	3,572
2022	3,354	2072	4,555
2023	3,401	2073	3,573
2024	4,852	2074	3,432
2025	6,552	2075	6,225
2026	6,162	2076	4,4
2027	3,9	2077	3,651
2028	6,848	2078	3,775
2029	3,931	2079	3,51
2030	3,791	2080	5,445
2031	3,588	2081	6,474
2032	3,838	2082	6,973
2033	4,212	2083	8,253
2034	8,689	2084	4,368
2035	3,057	2085	327,99
2036	18,361	2086	4,337
2037	3,759	2087	3,931
2038	4,368	2088	17,69
2039	4,898	2089	3,494
2040	3,744	2090	3,603
2041	3,401	2091	4,415
2042	16,333	2092	3,401
2043	4,275	2093	4,353
2044	4,18	2094	6,848
2045	4,071	2095	4,134
2046	3,963	2096	4,524
2047	4,306	2097	3,681
2048	3,728	2098	3,573
2049	3,573	2099	3,635
2050	3,619	2100	52,073

Протокол экспериментов № 22

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 15; суммарная длина сценариев работы –750.

Номер эксперимента	Время, с	Номер эксперимента	Время, с
2101	8,003	2151	6,1
2102	6,708	2152	7,129
2103	6,88	2153	6,802
2104	6,208	2154	7,254
2105	7,754	2155	7,005
2106	6,053	2156	13,947
2107	6,599	2157	6,037
2108	7,831	2158	9,204
2109	9,516	2159	6,396
2110	7,192	2160	6,364
2111	40,747	2161	9,298
2112	11,31	2162	6,412
2113	6,442	2163	6,786
2114	6,506	2164	6,63
2115	9,563	2165	6,381
2116	8,097	2166	7,629
2117	8,596	2167	5,975
2118	5,678	2168	6,053
2119	6,1	2169	5,522
2120	6,084	2170	7,005
2121	6,209	2171	6,068
2122	7,254	2172	5,273
2123	7,192	2173	6,333
2124	8,923	2174	7,083
2125	8,564	2175	6,506
2126	8,876	2176	6,147
2127	5,991	2177	6,099
2128	6,584	2178	7,379
2129	7,176	2179	6,739
2130	6,49	2180	6,505
2131	6,24	2181	6,474
2132	7,207	2182	5,834
2133	8,097	2183	6,099
2134	5,896	2184	7,364
2135	6,896	2185	7,551
2136	6,037	2186	6,365
2137	6,942	2187	6,194
2138	6,443	2188	6,224
2139	7,286	2189	9,672
2140	10,655	2190	32,963
2141	6,926	2191	7,878
2142	30,435	2192	6,739
2143	6,209	2193	12,059
2144	6,724	2194	6,802
2145	6,49	2195	12,495
2146	5,99	2196	6,505

2147	6,755	2197	6,692
2148	6,864	2198	6,537
2149	8,721	2199	6,646
2150	6,365	2200	6,1

Протокол экспериментов № 23

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 15; суммарная длина сценариев работы –1000.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
2201	11,466	2251	10
2202	9,516	2252	9,968
2203	15,85	2253	10,624
2204	9,547	2254	10,062
2205	10,514	2255	12,527
2206	12,215	2256	10,203
2207	13,276	2257	8,908
2208	9,578	2258	9,672
2209	9,609	2259	9,766
2210	13,962	2260	7,66
2211	10,233	2261	9,017
2212	15,491	2262	10,14
2213	10,561	2263	9,079
2214	9,547	2264	10,39
2215	15,382	2265	10,998
2216	9,063	2266	8,346
2217	7,831	2267	9,765
2218	10,264	2268	72,15
2219	7,956	2269	11,295
2220	10,904	2270	11,731
2221	11,7	2271	13,853
2222	8,689	2272	13,556
2223	12,886	2273	13,369
2224	14,04	2274	10,39
2225	9,922	2275	9,64
2226	9,048	2276	10,952
2227	12,902	2277	9,407
2228	9,407	2278	51,949
2229	10,515	2279	9,813
2230	9,984	2280	10,437
2231	10,342	2281	8,58
2232	9,952	2282	10,514
2233	9,579	2283	9,204
2234	11,622	2284	11,903
2235	8,845	2285	9,313

2236	9,688	2286	13,618
2237	11,186	2287	10,92
2238	12,496	2288	11,107
2239	8,377	2289	9,906
2240	9,532	2290	9,953
2241	10,327	2291	13,978
2242	16,255	2292	17,16
2243	11,793	2293	9,329
2244	9,735	2294	11,7
2245	9,25	2295	9,828
2246	11,216	2296	9,609
2247	13,853	2297	16,599
2248	8,985	2298	9,267
2249	9,391	2299	8,83
2250	9,61	2300	12,137

Протокол экспериментов № 24

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 15; суммарная длина сценариев работы –1250.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
2301	10,67	2351	11,902
2302	14,664	2352	12,184
2303	12,34	2353	16,302
2304	13,306	2354	14,523
2305	11,247	2355	15,475
2306	14,133	2356	12,683
2307	13,494	2357	14,633
2308	11,95	2358	18,003
2309	16,271	2359	12,995
2310	16,364	2360	11,622
2311	19,485	2361	15,116
2312	15,771	2362	11,622
2313	14,009	2363	1618,955
2314	23,977	2364	12,121
2315	16,208	2365	15,803
2316	17,425	2366	13,884
2317	12,824	2367	12,73
2318	14,321	2368	14,696
2319	14,508	2369	13,837
2320	13,946	2370	15,273
2321	18,564	2371	13,369
2322	12,48	2372	11,435
2323	12,449	2373	14,243
2324	10,545	2374	14,461

2325	14,446	2375	11,497
2326	13,463	2376	14,305
2327	13,931	2377	13,245
2328	17,27	2378	12,09
2329	18,112	2379	15,116
2330	14,898	2380	16,942
2331	12,106	2381	12,527
2332	14,805	2382	17,067
2333	12,636	2383	14,789
2334	18,283	2384	14,555
2335	13,541	2385	13,697
2336	11,809	2386	14,43
2337	13,915	2387	12,511
2338	12,792	2388	14,695
2339	14,227	2389	15,366
2340	14,056	2390	11,762
2341	14,898	2391	11,919
2342	17,44	2392	15,335
2343	12,542	2393	14,118
2344	13,557	2394	12,698
2345	20,451	2395	30,685
2346	13,291	2396	12,37
2347	14,399	2397	14,851
2348	16,053	2398	14,664
2349	15,631	2399	12,745
2350	15,32	2400	14,695

Протокол экспериментов № 25

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 15; суммарная длина сценариев работы –1500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
2401	23,057	2451	18,986
2402	19,11	2452	19,5
2403	18,299	2453	31,137
2404	21,216	2454	19,687
2405	17,597	2455	19,563
2406	17,191	2456	23,432
2407	20,467	2457	20,53
2408	21,341	2458	19,796
2409	19,25	2459	20,498
2410	17,566	2460	17,644
2411	20,14	2461	17,269
2412	21,778	2462	15,944
2413	19,781	2463	16,395

2414	18,626	2464	22,261
2415	21,887	2465	18,174
2416	20,28	2466	21,2
2417	22,168	2467	17,409
2418	23,962	2468	18,112
2419	25,834	2469	19,312
2420	20,14	2470	23,572
2421	23,432	2471	19,703
2422	19,968	2472	19,609
2423	19,937	2473	18,112
2424	19,063	2474	18,33
2425	24,086	2475	19,375
2426	21,138	2476	24,914
2427	17,815	2477	16,084
2428	19,609	2478	19,157
2429	18,408	2479	22,121
2430	18,798	2480	18,111
2431	23,041	2481	21,777
2432	18,018	2482	19,204
2433	18,501	2483	19,797
2434	19,5	2484	16,692
2435	17,878	2485	17,316
2436	18,814	2486	33,103
2437	17,581	2487	18,657
2438	14,898	2488	19,204
2439	15,288	2489	18,97
2440	17,425	2490	17,644
2441	18,595	2491	19,297
2442	20,358	2492	21,341
2443	19,641	2493	19,126
2444	21,809	2494	26,894
2445	17,036	2495	18,782
2446	20,436	2496	16,973
2447	17,441	2497	19,422
2448	19,453	2498	20,155
2449	19,188	2499	20,046
2450	19,204	2500	21,075

Протокол экспериментов № 26

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 15; суммарная длина сценариев работы –1750.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
2501	24,945	2551	24,913
2502	28,174	2552	23,369

2503	24,539	2553	33,914
2504	24,882	2554	23,79
2505	26,832	2555	28,845
2506	27,331	2556	26,364
2507	32,479	2557	25,724
2508	25,615	2558	35,584
2509	28,173	2559	24,773
2510	48,734	2560	25,428
2511	24,788	2561	27,019
2512	32,806	2562	26,41
2513	25,085	2563	24,508
2514	25,958	2564	25,022
2515	24,601	2565	25,085
2516	23,26	2566	23,056
2517	27,924	2567	25,194
2518	24,914	2568	45,849
2519	23,353	2569	24,866
2520	25,694	2570	24,57
2521	30,872	2571	25,319
2522	65,91	2572	23,603
2523	21,17	2573	25,256
2524	25,787	2574	21,513
2525	20,03	2575	25,038
2526	24,399	2576	26,785
2527	21,731	2577	24,196
2528	22,027	2578	28,641
2529	23,119	2579	29,733
2530	20,763	2580	24,461
2531	32,464	2581	34,008
2532	26,286	2582	25,662
2533	21,2	2583	30,95
2534	26,988	2584	72,056
2535	23,073	2585	24,539
2536	20,451	2586	25,818
2537	24,242	2587	28,797
2538	25,927	2588	27,456
2539	60,372	2589	21,154
2540	24,679	2590	20,529
2541	26,255	2591	32,573
2542	23,915	2592	28,002
2543	29,531	2593	26,161
2544	27,051	2594	25,287
2545	24,57	2595	26,286
2546	23,088	2596	26,239
2547	25,382	2597	24,554
2548	30,639	2598	37,268
2549	26,021	2599	24,711
2550	25,412	2600	24,835

Протокол экспериментов № 27

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 15; суммарная длина сценариев работы –2000.

Номер эксперимента	Время, с	Номер эксперимента	Время, с
2601	39,483	2651	30,404
2602	32,791	2652	34,133
2603	37,128	2653	27,908
2604	26,551	2654	35,896
2605	22,167	2655	33,182
2606	36,302	2656	30,998
2607	32,058	2657	30,342
2608	27,706	2658	34,788
2609	31,933	2659	30,654
2610	27,222	2660	31,2
2611	35,084	2661	27,347
2612	25,101	2662	27,893
2613	29,578	2663	35,038
2614	31,262	2664	28,548
2615	31,824	2665	28,454
2616	28,252	2666	33,4
2617	37,596	2667	28,33
2618	31,824	2668	28,455
2619	27,362	2669	28,891
2620	31,731	2670	29,375
2621	35,552	2671	30,342
2622	31,2	2672	25,257
2623	38,033	2673	32,667
2624	24,492	2674	26,442
2625	36,582	2675	30,03
2626	29,422	2676	36,067
2627	25,677	2677	41,73
2628	27,799	2678	30,888
2629	29,983	2679	28,767
2630	26,894	2680	42,619
2631	34,445	2681	36,364
2632	29,594	2682	30,046
2633	25,101	2683	31,902
2634	30,42	2684	34,491
2635	30,015	2685	31,294
2636	23,416	2686	39,717
2637	45,988	2687	35,006
2638	35,989	2688	30,779
2639	30,31	2689	33,509

2640	38,422	2690	29,5
2641	32,355	2691	34,882
2642	35,599	2692	31,964
2643	29,422	2693	29,141
2644	26,723	2694	36,161
2645	25,334	2695	30,716
2646	31,341	2696	30,841
2647	26,582	2697	28,907
2648	34,18	2698	31,341
2649	28,579	2699	28,891
2650	29,999	2700	30,779

Протокол экспериментов № 28

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 15; суммарная длина сценариев работы –2250.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
2701	44,304	2751	40,029
2702	34,757	2752	34,257
2703	44,086	2753	32,776
2704	43,259	2754	38,86
2705	39,437	2755	35,911
2706	32,386	2756	35,084
2707	36,832	2757	31,887
2708	44,866	2758	32,292
2709	34,944	2759	45,364
2710	40,404	2760	34,99
2711	40,28	2761	37,643
2712	40,95	2762	41,558
2713	33,571	2763	38,111
2714	43,352	2764	43,54
2715	40,732	2765	35,1
2716	35,412	2766	40,31
2717	37,159	2767	40,217
2718	40,029	2768	41,637
2719	45,677	2769	42,307
2720	40,185	2770	42,167
2721	66,566	2771	37,362
2722	34,6	2772	43,946
2723	41,777	2773	38,766
2724	44,85	2774	44,959
2725	39,842	2775	36,972
2726	35,256	2776	31,856
2727	39,188	2777	34,429
2728	28,034	2778	40,092

2729	39,968	2779	41,184
2730	31,434	2780	32,495
2731	37,191	2781	41,371
2732	35,022	2782	36,005
2733	36,878	2783	32,463
2734	41,667	2784	40,483
2735	42,213	2785	41,511
2736	41,293	2786	41,933
2737	41,403	2787	50,107
2738	32,776	2788	41,824
2739	39,531	2789	29,079
2740	37,799	2790	42,182
2741	34,087	2791	43,852
2742	39,655	2792	39,874
2743	49,437	2793	47,081
2744	39,484	2794	72,087
2745	39,967	2795	40,248
2746	27,908	2796	35,412
2747	39,172	2797	55,084
2748	37,612	2798	30,514
2749	37,705	2799	38,204
2750	40,186	2800	47,362

Протокол экспериментов № 29

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 15; суммарная длина сценариев работы –2500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
2801	46,566	2851	47,175
2802	41,824	2852	47,861
2803	45,864	2853	42,822
2804	42,775	2854	40,061
2805	41,761	2855	49,359
2806	42,729	2856	39,655
2807	49,031	2857	38,579
2808	66,003	2858	45,303
2809	53,43	2859	47,44
2810	43,321	2860	44,038
2811	45,053	2861	56,738
2812	39,406	2862	102,804
2813	45,084	2863	27,519
2814	38,876	2864	41,355
2815	50,669	2865	40,981
2816	43,914	2866	42,463
2817	44,694	2867	42,23

2818	44,897	2868	47,908
2819	46,192	2869	44,242
2820	40,856	2870	43,071
2821	44,99	2871	42,074
2822	42,479	2872	45,833
2823	41,48	2873	38,423
2824	43,274	2874	40,887
2825	59,982	2875	34,851
2826	45,006	2876	38,657
2827	47,221	2877	37,627
2828	35,241	2878	42,744
2829	43,135	2879	45,864
2830	44,679	2880	41,698
2831	34,944	2881	44,101
2832	52,915	2882	41,496
2833	63,742	2883	43,509
2834	45,506	2884	57,72
2835	43,087	2885	39,577
2836	42,214	2886	40,654
2837	47,439	2887	45,49
2838	44,476	2888	47,845
2839	41,152	2889	40,513
2840	37,908	2890	49,843
2841	42,058	2891	38,781
2842	41,808	2892	41,949
2843	53,18	2893	44,881
2844	41,152	2894	40,108
2845	41,199	2895	35,677
2846	45,412	2896	42,573
2847	44,148	2897	44,086
2848	50,591	2898	39,578
2849	41,871	2899	43,899
2850	38,594	2900	37,986

Протокол экспериментов № 30

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 20; суммарная длина сценариев работы –750.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
2901	15,132	2951	41,824
2902	13,182	2952	11,778
2903	143,77	2953	40,904
2904	13,509	2954	15,912
2905	13,291	2955	21,17
2906	12,558	2956	11,981

2907	16,037	2957	12,73
2908	12,963	2958	137,889
2909	819,719	2959	100,308
2910	211,506	2960	12,074
2911	233,548	2961	15,834
2912	12,807	2962	54,772
2913	21,138	2963	58,391
2914	516,563	2964	14,274
2915	139,901	2965	48,127
2916	20,031	2966	3254,05
2917	114,286	2967	213,642
2918	13,712	2968	170,758
2919	15,646	2969	124,535
2920	15,147	2970	14,976
2921	14,524	2971	11,169
2922	174,377	2972	847,035
2923	48,781	2973	37,83
2924	9,953	2974	39,905
2925	18,205	2975	19,11
2926	19,438	2976	132,991
2927	67,985	2977	17,378
2928	11,544	2978	104,13
2929	16,178	2979	12,168
2930	40,279	2980	11,95
2931	13,416	2981	18,658
2932	115,285	2982	13,041
2933	11,481	2983	13,806
2934	25,147	2984	11,513
2935	12,902	2985	16,91
2936	11,747	2986	19,734
2937	14,992	2987	105,332
2938	7,987	2988	18,876
2939	45,318	2989	1062,923
2940	37,503	2990	10,67
2941	45,896	2991	40,107
2942	16,786	2992	28,533
2943	19,765	2993	15,6
2944	10,342	2994	12,76
2945	9,376	2995	226,434
2946	12,246	2996	14,96
2947	22,526	2997	9,672
2948	16,255	2998	16,162
2949	14,289	2999	14,071
2950	21,497	3000	11,092

Протокол экспериментов № 31

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 20; суммарная длина сценариев работы –1000.

Номер эксперимента	Время, с	Номер эксперимента	Время, с
3001	17,285	3051	39,484
3002	19,235	3052	17,691
3003	779,673	3053	43,259
3004	23,354	3054	26,535
3005	38,672	3055	25,054
3006	17,674	3056	22,261
3007	19,749	3057	19,484
3008	29,359	3058	16,037
3009	107,593	3059	27,519
3010	34,866	3060	97,89
3011	19,922	3061	17,363
3012	82,134	3062	707,554
3013	633,892	3063	43,04
3014	16,27	3064	18,127
3015	25,147	3065	16,24
3016	20,982	3066	18,767
3017	378,207	3067	19,952
3018	16,348	3068	15,085
3019	23,868	3069	16,177
3020	844,367	3070	440,951
3021	44,522	3071	17,144
3022	16,723	3072	19,235
3023	18,501	3073	127,311
3024	15,585	3074	20,233
3025	18,766	3075	19,532
3026	82,726	3076	172,911
3027	22,308	3077	128,841
3028	33,976	3078	16,739
3029	55,412	3079	20,795
3030	16,037	3080	27,097
3031	19,095	3081	17,113
3032	16,38	3082	23,103
3033	16,333	3083	43,321
3034	24,196	3084	15,912
3035	47,705	3085	32,838
3036	26,239	3086	73,569
3037	29,359	3087	393,386
3038	17,8	3088	22,277
3039	122,164	3089	152,334
3040	2265,109	3090	284,249
3041	20,639	3091	364,183
3042	17,363	3092	23,01
3043	17,566	3093	30,607

3044	84,489	3094	19,797
3045	65,941	3095	18,205
3046	20,53	3096	16,848
3047	112,788	3097	20,327
3048	20,452	3098	81,478
3049	53,883	3099	18,486
3050	17,472	3100	22,495

Протокол экспериментов № 32

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 20; суммарная длина сценариев работы –1250.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
3101	767,834	3151	117,733
3102	24,024	3152	113,053
3103	29,671	3153	26,645
3104	193,347	3154	41,231
3105	26,894	3155	226,98
3106	27,237	3156	23,54
3107	39,312	3157	22,043
3108	22,964	3158	25,755
3109	27,019	3159	29,343
3110	25,49	3160	24,914
3111	27,237	3161	29,983
3112	29,406	3162	79,856
3113	44,694	3163	75,27
3114	29,656	3164	36,66
3115	26,177	3165	20,78
3116	122,632	3166	25,085
3117	43,399	3167	307,055
3118	83,445	3168	25,225
3119	22,074	3169	29,234
3120	34,523	3170	25,912
3121	114,38	3171	22,885
3122	67,953	3172	29,125
3123	382,154	3173	25,397
3124	33,728	3174	40,295
3125	20,638	3175	27,784
3126	21,216	3176	23,509
3127	25,07	3177	38,298
3128	128,498	3178	30,264
3129	25,475	3179	34,928
3130	24,773	3180	28,205
3131	26,036	3181	29,25
3132	28,112	3182	111,197

3133	429,094	3183	35,21
3134	22,636	3184	40,732
3135	35,958	3185	96,44
3136	22,215	3186	188,651
3137	29,188	3187	36,785
3138	28,782	3188	194,283
3139	82,696	3189	19,656
3140	31,683	3190	23,946
3141	22,027	3191	29,515
3142	43,696	3192	45,162
3143	18,876	3193	20,826
3144	26,349	3194	151,679
3145	25,366	3195	42,073
3146	26,255	3196	73,476
3147	35,818	3197	25,49
3148	31,044	3198	471,929
3149	46,348	3199	28,36
3150	75,207	3200	97,531

Протокол экспериментов № 33

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 20; суммарная длина сценариев работы –1500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
3201	34,523	3251	36,036
3202	34,476	3252	28,533
3203	41,465	3253	46,769
3204	25,179	3254	104,083
3205	136,625	3255	31,138
3206	38,579	3256	27,799
3207	33,634	3257	320,705
3208	51,605	3258	35,241
3209	37,019	3259	31,949
3210	33,681	3260	29,843
3211	45,739	3261	39,031
3212	31,122	3262	34,929
3213	53,945	3263	63,742
3214	50,123	3264	29,063
3215	33,806	3265	37,924
3216	37,565	3266	40,483
3217	42,963	3267	270,161
3218	45,926	3268	34,492
3219	42,947	3269	30,67
3220	36,551	3270	157,17
3221	38,704	3271	56,847

3222	27,019	3272	137,764
3223	110,168	3273	29,032
3224	28,33	3274	36,816
3225	52,712	3275	53,118
3226	29,109	3276	43,618
3227	32,651	3277	31,418
3228	38,064	3278	42,791
3229	294,061	3279	35,693
3230	40,529	3280	33,041
3231	297,227	3281	100,745
3232	161,757	3282	42,791
3233	34,539	3283	28,158
3234	45,693	3284	56,8
3235	30,374	3285	28,251
3236	31,122	3286	34,024
3237	42,744	3287	34,305
3238	57,284	3288	37,05
3239	34,632	3289	101,213
3240	45,584	3290	30,482
3241	42,541	3291	35,521
3242	39,141	3292	39,124
3243	37,143	3293	33,852
3244	121,868	3294	33,244
3245	256,215	3295	26,894
3246	36,832	3296	31,73
3247	57,954	3297	40,358
3248	39,358	3298	39,203
3249	162,287	3299	33,119
3250	31,278	3300	33,962

Протокол экспериментов № 34

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 20; суммарная длина сценариев работы –1750.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
3301	40,17	3351	44,959
3302	50,247	3352	43,509
3303	42,245	3353	41,793
3304	212,347	3354	40,435
3305	42,432	3355	61,277
3306	46,66	3356	52,947
3307	37,393	3357	41,886
3308	50,092	3358	57,892
3309	40,638	3359	52,182
3310	66,643	3360	37,534

3311	260,131	3361	36,738
3312	51,714	3362	45,287
3313	42,698	3363	45,692
3314	71,62	3364	48,594
3315	37,596	3365	71,666
3316	44,741	3366	53,82
3317	40,123	3367	36,504
3318	36,146	3368	39,202
3319	58,188	3369	39,827
3320	45,896	3370	39,686
3321	45,614	3371	37,954
3322	36,754	3372	43,025
3323	44,929	3373	78,141
3324	391,202	3374	64,257
3325	41,965	3375	44,881
3326	55,38	3376	58,937
3327	115,55	3377	39,921
3328	285,683	3378	42,292
3329	121,025	3379	59,343
3330	51,448	3380	40,701
3331	143,864	3381	54,491
3332	40,014	3382	44,304
3333	42,806	3383	69,842
3334	50,076	3384	438,953
3335	174,237	3385	193,315
3336	42,166	3386	79,935
3337	40,872	3387	364,183
3338	62,587	3388	45,006
3339	36,223	3389	34,772
3340	53,15	3390	40,794
3341	44,46	3391	45,302
3342	41,543	3392	40,076
3343	42,791	3393	122,507
3344	44,366	3394	101,447
3345	64,849	3395	32,994
3346	41,199	3396	32,963
3347	332,405	3397	40,311
3348	516,938	3398	50,591
3349	38,47	3399	4578,311
3350	68,703	3400	32,698

Протокол экспериментов № 35

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 20; суммарная длина сценариев работы –2000.

Номер эксперимента	Время, с	Номер эксперимента	Время, с
3401	69,92	3451	45,958
3402	49,873	3452	51,683
3403	275,887	3453	57,268
3404	58,797	3454	47,331
3405	66,908	3455	55,068
3406	64,771	3456	47,674
3407	47,205	3457	51,994
3408	46,082	3458	49,046
3409	54,225	3459	149,605
3410	51,776	3460	50,263
3411	52,151	3461	55,443
3412	50,404	3462	308,475
3413	50,949	3463	52,541
3414	64,178	3464	189,416
3415	53,586	3465	45,724
3416	42,339	3466	64,007
3417	52,494	3467	61,543
3418	44,851	3468	42,37
3419	165,485	3469	60,684
3420	146,719	3470	56,566
3421	51,402	3471	46,863
3422	49,031	3472	207,73
3423	50,294	3473	44,242
3424	44,273	3474	84,505
3425	199,181	3475	75,91
3426	49,141	3476	50,201
3427	66,41	3477	45,88
3428	51,839	3478	64,288
3429	70,107	3479	52,541
3430	63,741	3480	48,251
3431	174,315	3481	54,787
3432	56,019	3482	48,5
3433	67,829	3483	68,75
3434	49,592	3484	65,333
3435	52,869	3485	338,942
3436	78,703	3486	45,848
3437	51,199	3487	51,449
3438	48,673	3488	54,787
3439	75,192	3489	506,096
3440	72,618	3490	46,301
3441	45,396	3491	160,695
3442	44,507	3492	53,758
3443	54,085	3493	42,198
3444	64,709	3494	131,774
3445	44,273	3495	45,661
3446	56,16	3496	76,393

3447	44,507	3497	49,171
3448	73,788	3498	42,978
3449	42,23	3499	143,068
3450	146,812	3500	52,135

Протокол экспериментов № 36

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 20; суммарная длина сценариев работы –2250.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
3501	49,858	3551	58,188
3502	61,573	3552	55,692
3503	56,815	3553	56,285
3504	140,696	3554	55,692
3505	63,07	3555	61,901
3506	46,051	3556	143,037
3507	59,514	3557	52,713
3508	46,784	3558	54,522
3509	50,966	3559	53,555
3510	146,219	3560	55,864
3511	104,006	3561	82,446
3512	83,398	3562	51,339
3513	68,952	3563	47,315
3514	138,061	3564	64,351
3515	46,099	3565	46,737
3516	52,353	3566	96,735
3517	88,328	3567	45,349
3518	509,762	3568	65,224
3519	54,849	3569	57,206
3520	64,131	3570	53,601
3521	200,678	3571	89,607
3522	59,467	3572	54,023
3523	68,999	3573	51,075
3524	56,597	3574	52,151
3525	87,999	3575	295,48
3526	52,104	3576	92,649
3527	62,572	3577	66,222
3528	64,85	3578	59,81
3529	52,26	3579	152,646
3530	56,051	3580	55,536
3531	59,733	3581	49,92
3532	68,359	3582	58,656
3533	82,836	3583	43,649
3534	56,051	3584	62,057
3535	67,392	3585	63,866

3536	47,346	3586	83,382
3537	55,303	3587	48,313
3538	55,614	3588	52,011
3539	78,562	3589	66,082
3540	51,964	3590	58,157
3541	127,593	3591	66,612
3542	107,11	3592	57,033
3543	59,982	3593	88,733
3544	61,183	3594	69,997
3545	93,335	3595	49
3546	63,688	3596	53,43
3547	59,155	3597	60,481
3548	214,765	3598	50,591
3549	54,475	3599	210,538
3550	50,95	3600	62,93

Протокол экспериментов № 37

Параметры экспериментов: число состояний искомого автомата – 20; суммарная длина сценариев работы –2500.

Номер эксперимента	**Время, с**	**Номер эксперимента**	**Время, с**
3601	68,906	3651	71,183
3602	63,227	3652	64,319
3603	79,716	3653	61,449
3604	60,996	3654	59,92
3605	109,044	3655	59,935
3606	68,095	3656	112,117
3607	52,01	3657	62,602
3608	130,822	3658	60,825
3609	52,307	3659	57,767
3610	66,597	3660	175,796
3611	58,625	3661	155,033
3612	212,91	3662	74,678
3613	73,804	3663	71,605
3614	78,936	3664	119,34
3615	102,04	3665	50,264
3616	73,101	3666	76,408
3617	73,335	3667	68,141
3618	167,248	3668	72,478
3619	70,372	3669	84,661
3620	51,48	3670	168,449
3621	60,778	3671	153,005
3622	68,936	3672	66,207
3623	88,795	3673	58,625
3624	53,524	3674	62,197

3625	64,522	3675	75,067
3626	57,065	3676	58,126
3627	73,508	3677	64,74
3628	58,406	3678	81,651
3629	87,516	3679	71,479
3630	78,375	3680	66,627
3631	66,768	3681	76,674
3632	55,286	3682	56,488
3633	55,88	3683	84,443
3634	60,434	3684	113,912
3635	51,776	3685	60,933
3636	58,609	3686	69,186
3637	445,88	3687	60,138
3638	68,344	3688	62,431
3639	58,391	3689	77,579
3640	90,325	3690	58,906
3641	63,274	3691	66,285
3642	52,541	3692	74,35
3643	56,316	3693	88,078
3644	61,963	3694	57,111
3645	78,889	3695	224,406
3646	59,015	3696	58,344
3647	69,171	3697	83,897
3648	62,29	3698	64,896
3649	418,143	3699	62,931
3650	43,306	3700	62,509

ПРИЛОЖЕНИЕ В. КОПИЯ СПРАВКИ И ТЕКСТ СТАТЬИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

№ 131 от "15" 10 2012 г.

На _____ от "___" _____ 201__ г.

СПРАВКА

Выдана авторам Д. С. Чивилихину и В. И. Ульянцеву в том, что их статья «Метод построения управляющих автоматов на основе муравьиных алгоритмов» принята к опубликованию в № 6 (2012 год) Научно-технического вестника информационных технологий, механики и оптики.

Выход номера из печати в начале ноября 2012 года.

Заместитель главного редактора Н.С. Кармановский

Почтовый адрес 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49, комн. 330
Тел./факс +7 (812) 2334551
Эл. почта karmanov@mail.ifmo.ru
Сайт books.ifmo.ru/ntv

УДК 004.4'242

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ НА ОСНОВЕ МУРАВЬИНЫХ АЛГОРИТМОВ

Д.С. Чивилихин, В.И. Ульянцев

Предлагается метод построения управляющих конечных автоматов по выбранной функции приспособленности, основанный на применении муравьиных алгоритмов. Проводится его апробация на задаче об «Умном муравье». Показано, что метод обладает большей производительностью по сравнению с традиционным подходом к построению управляющих автоматов на основе генетических алгоритмов. Предлагаемый метод не требует реализации таких нетривиальных операторов как, например, скрещивание или мутация.

Ключевые слова: конечные автоматы, муравьиные алгоритмы.

Введение

В последние годы для решения разнообразных задач все чаще применяется автоматное программирование [1]. В рамках этого подхода поведение программ описывается с помощью детерминированных конечных автоматов. При этом часто эвристическое построение автоматов затруднительно, поэтому для этой цели применяются различные эволюционные алгоритмы, такие как генетические алгоритмы [2–5] и эволюционные стратегии [2, 6].

При построении автоматов с помощью эволюционных алгоритмов вводится функция, называемая *функцией приспособленности*, отражающая то, насколько автомат близок к решению задачи. Таким образом, построение автомата для той или иной задачи сводится к построению автомата с наибольшим или наименьшим значением функции приспособленности. Отдельно отметим, что введение функции приспособленности не предполагает наличие эталонного автомата. Примерами задач, для которых можно найти решение, представленное управляющим автоматом, с помощью эволюционных алгоритмов, являются:

- задача об «Умном муравье» [1, 3, 7];
- задача о завоевании ресурсов [2];
- задача о построении автомата на основе тестовых примеров [3, 8].

В начале работы эволюционный алгоритм генерирует некую начальную популяцию особей (в данном случае, конечных автоматов). Обычно, особи начальной популяции генерируются случайным образом. Далее, пока не будет выполнено условие останова, выполняются операции мутации, скрещивания и селекции. Операции мутации и скрещивания по некоторым правилам изменяют особи в текущей популяции. Операция селекции определяет, какие особи перейдут в следующую популяцию.

При построении конечных автоматов с помощью эволюционных алгоритмов требуется разрабатывать операции мутации и скрещивания. В настоящей работе предлагается новый метод построения управляющих автоматов, основанный на муравьином алгоритме [9], не требующий реализации обозначенных операций.

Вопрос сходимости муравьиных алгоритмов изучен на данный момент сравнительно слабо. Доказательство сходимости некоторых классов муравьиных алгоритмов можно найти в [10]. Вопрос о сходимости других типов муравьиных алгоритмов остается на данный момент открытым. Сходимость предложенного алгоритма построения автоматов в настоящей работе не изучается.

Муравьиные алгоритмы

Муравьиные алгоритмы – группа алгоритмов оптимизации на графах, принцип работы которых основан на поведении муравьев, ищущих путь от муравейника до источника пищи. Примером задачи, которая может быть решена с помощью муравьиного алгоритма, является задача о коммивояжере [11].

В муравьиных алгоритмах решения строятся набором агентов-муравьев, использующих при выборе пути в графе некоторую стохастическую стратегию. Решения могут быть представлены как путями в графе, так и отдельными его вершинами. Каждому ребру графа (u, v) (u и v – вершины графа) сопоставлено некоторое действительное число τ_{uv}, называемое значением *феромона*, и (необязательно) некоторое *эвристическое расстояние* η_{uv}. Значения феромона модифициру-

ются муравьями в процессе поиска, в то время как эвристические расстояния задаются перед началом работы алгоритма и далее не изменяются.

Можно выделить три основных этапа работы муравьиного алгоритма, которые повторяются, пока не будет найдено допустимое решение или пока не выполнится условие останова. На первом этапе, назовем его `ConstructSolutions`, каждый муравей совершает переходы по ребрам графа, запоминая свой путь – последовательность ребер. Находясь в определенной вершине, каждый муравей определяет следующее ребро, исходя из эвристических расстояний и значений феромона на ребрах, инцидентных данной вершине. Определив ребро, муравей добавляет его к своему пути и переходит по этому ребру к следующей вершине.

На втором этапе – `UpdatePheromones` – значения феромона на всех ребрах графа изменяются. Значение феромона на ребре может увеличиться, если по этому ребру прошел муравей, или уменьшиться вследствие испарения. При испарении значения феромона на всех ребрах графа изменяются в заданное число раз. На третьем (необязательном) этапе – `DaemonActions` – применяется некоторая локальная оптимизация или другие действия, которые не могут быть выполнены отдельными муравьями.

Управляющие конечные автоматы

Будем называть *управляющим* детерминированный конечный автомат (ДКА), на каждом переходе которого записаны событие и последовательность выходных воздействий. События поступают на вход автомата из внешней среды. При поступлении события автомат переходит в новое состояние и передает выходные воздействия объекту управления. Пример управляющего конечного автомата приведен на рис. 1.

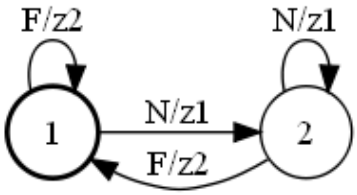

Рис. 1. Пример управляющего конечного автомата

Для данного автомата множество входных событий равно $\{F, N\}$, а множество выходных воздействий – $\{z1, z2\}$. Стартовое состояние автомата на рис. 1 и на всех других рисунках в данной работе отмечено жирной линией.

Предлагаемый метод построения управляющих автоматов на основе муравьиных алгоритмов

Рассмотрим задачу о построении управляющего конечного автомата [1] при фиксированном множестве входных событий, выходных воздействий и введенной функции приспособленности. Пусть задано число состояний *N*, множество входных событий *Events* и множество выходных воздействий *Actions* автомата. Задача состоит в поиске автомата с наибольшим значением функции приспособленности.

Рассмотрим представление конечного автомата в виде графа переходов. При этом подходе состояния автомата соответствуют вершинам графа, а переходы – его дугам. Рассмотрим множество всех автоматов с параметрами (*N*, *Events*, *Actions*). Любой автомат из выбранного множества как граф является подграфом *полного недетерминированного конечного автомата* (НКА) с теми же параметрами. Под полным НКА понимается автомат, в котором из каждого из *N* состояний по каждому входному событию из *Events* существует переход в каждое состояние с каждым выходным воздействием из *Actions*. Пример такого автомата с двумя состояниями приведен на рис. 2.

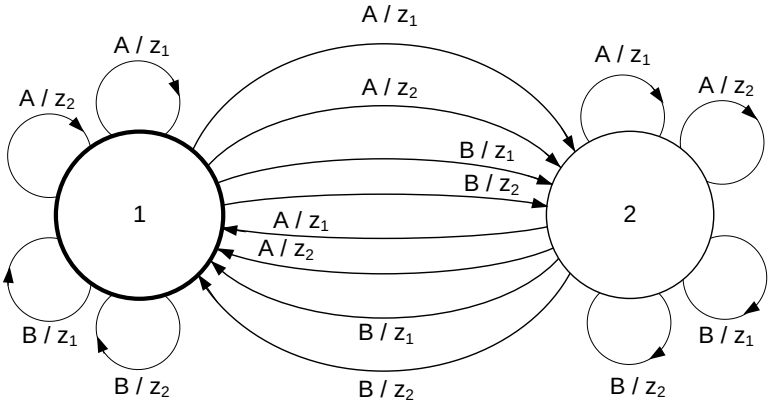

Рис. 2. Пример полного недетерминированного конечного автомата

Задача оптимизации ДКА для муравьиного алгоритма может быть сформулирована следующим образом. Задано множество входных событий *Events*, множество выходных воздействий *Actions* и число состояний *N*. Также задана функция приспособленности, определенная на множестве всех ДКА с указанными параметрами, сопоставляющая автомату действительное число. На полном НКА с теми же параметрами требуется найти такой путь, что ДКА, составленный из ребер и вершин найденного пути, имеет наибольшую функцию приспособленности.

В начале работы алгоритма всем ребрам полного НКА приписывается некоторый одинаковый ненулевой *вес* – значение феромона в терминах муравьиных алгоритмов. В каждую вершину полного НКА помещается по муравью. Каждый муравей выбирает переходы из своего состояния по каждому входному символу, исходя из значений феромона на переходах. Выбор производится с помощью метода «рулетки» [12].

Заметим, что в отличие от классического муравьиного алгоритма, описанного в разделе «Муравьиные алгоритмы», каждый муравей строит переходы только из своего состояния, не перемещаясь в другие состояния (вершины).

По выбранным муравьями состояниям и переходам строится ДКА. Далее для ДКА вычисляется выбранная функция приспособленности. При этом запоминаются переходы, которые совершал автомат. К весам посещенных при вычислении функции приспособленности переходов НКА добавляются дополнительные веса, пропорциональные вычисленному значению. Отметим, что веса тех переходов, которые не были посещены при вычислении функции приспособленности, не изменяются, а сами переходы удаляются из ДКА. Также из ДКА удаляются непосещенные состояния.

На следующем этапе со всех ребер НКА «испаряется» феромон – веса всех ребер уменьшаются в одинаковое число раз.

Наконец, проверяются условия сходимости (достижения требуемого значения функции приспособленности) и стагнации. Под стагнацией понимается ситуация, при которой значение функции приспособленности лучшего автомата не увеличивается в течение некоторого фиксированного промежутка времени (числа шагов алгоритма). В таком случае алгоритм перезапускается. При достижении требуемого значения функции приспособленности алгоритм прекращает свою работу, выдавая лучший из построенных автоматов.

Экспериментальное исследование

В рамках экспериментального исследования предлагаемый метод был протестирован на задаче об «Умном муравье» [1, 4, 7]. Для вычислений использовался персональный компьютер с процессором Intel Core i7 2600 с тактовой частотой 3,4 ГГц.

Опишем задачу об «Умном муравье». Задано квадратное тороидальное поле размером 32×32 клетки. На поле вдоль заданной ломаной расположено 89 «яблок» – единиц еды, причем яблоки располагаются не в каждой клетке этой ломаной. В начале пути муравей находится в левой верхней клетке поля и «смотрит» на восток. Поле, начальное расположение муравья и расположение еды на поле показано на рис. 3. Белые клетки пусты, в черных клетках расположена еда, а серым цветом отмечены клетки ломаной, не содержащие еды.

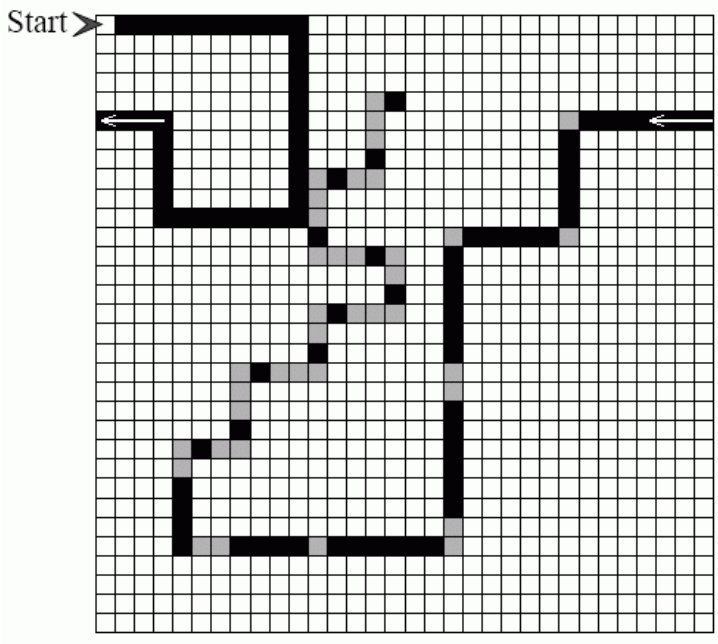

Рис. 3. Поле, начальное расположение муравья и еды в задаче об «Умном муравье»

Муравей видит одну клетку перед собой: он может определить, есть еда в следующей клетке или нет. У муравья есть 200 ходов. На каждом ходу он может выполнить одно из трех действий: повернуть налево, повернуть направо, перейти на одну клетку вперед. При этом если клетка, в которую перешел муравей, содержит еду, муравей съедает эту еду.

В данной задаче рассматриваются два входных события – **N** (в следующей клетке нет еды) и **F** (в следующей клетке есть еда) – а также три выходных воздействия: **L** (повернуть налево), **R** (повернуть направо) и **M** (перейти на одну клетку вперед).

Задача состоит в том, чтобы построить систему управления муравьем, которая позволит ему съесть всю еду за минимальное число шагов. В работе [4] предлагается решение данной задачи путем построения конечного автомата, управляющего муравьем, с помощью генетического программирования. В указанной работе был найден автомат, имеющий семь состояний и позволяющий муравью съесть всю еду за отведенное число шагов. Число вычислений функции приспособленности потребовавшихся для построения такого автомата – порядка сотен миллионов ($160 \cdot 10^6$ и $250 \cdot 10^6$ для двух разных экспериментов).

Традиционно функция приспособленности автомата, управляющего умным муравьем, имеет вид [1]:

$$f(fsm) = n + \frac{200 - numberOfSteps}{200}, \quad (1)$$

где *fsm* – конечный автомат, *n* – число съеденных яблок, а *numberOfSteps* – номер хода, на котором было съедено последнее яблоко.

При использовании функции приспособленности (1) предлагаемый муравьиный алгоритм не нашел оптимального решения задачи об «Умном муравье». В настоящей работе авторами предлагается использовать модифицированную функцию приспособленности, учитывающую число состояний автомата:

$$f(fsm) = n + \frac{200 - \mathrm{numberOfSteps}}{200} + 0{,}1 \cdot (M - N), \quad (2)$$

где M – число состояний НКА, в котором проводится поиск с помощью муравьиного алгоритма, а N – число состояний ДКА, посещенных при вычислении функции приспособленности. При использовании выражения (2), оптимизация проводится одновременно по числу съеденных яблок, числу потребовавшихся для этого шагов, а также по числу использованных состояний автомата.

Авторами было проведено 15 экспериментов по построению оптимального автомата. В каждом эксперименте были использованы следующие параметры алгоритма:

- скорость испарения феромона – 0,5;
- стагнационный параметр – 10^6;

– число состояний полного НКА – 12.

В каждом из экспериментов был получен автомат, имеющий семь состояний, который съедает всю еду за 189 ходов. Минимальное число вычислений функции приспособленности, потребовавшееся для построения оптимального автомата – $1,65 \cdot 10^6$, максимальное – $60,16 \cdot 10^6$, среднее значение – $26,49 \cdot 10^6$ (стандартное отклонение – $17,45 \cdot 10^6$). При этом среднее время построения оптимального автомата составило примерно 32 мин. Диаграмма переходов одного из построенных автоматов приведена на рис. 4.

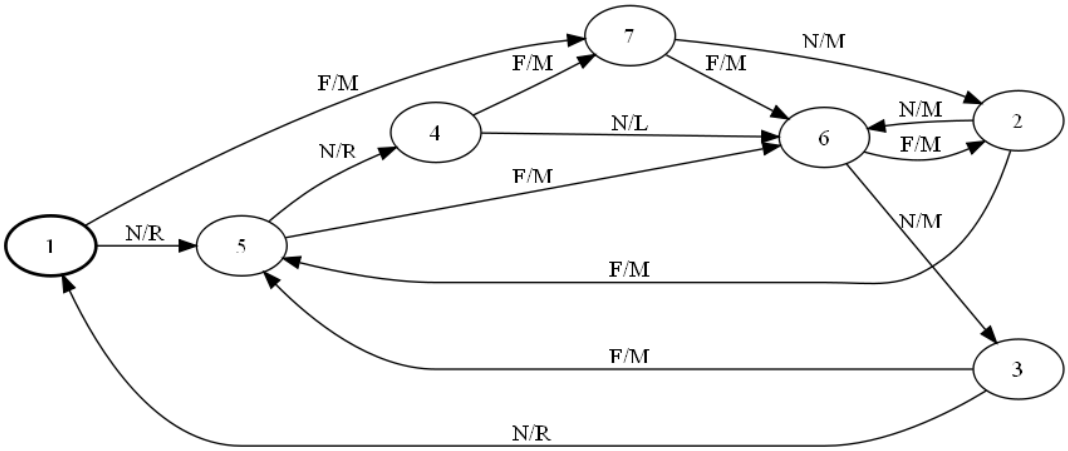

Рис. 4. Управляющий автомат для задачи об «Умном муравье»

При этом отметим, что для построения такого автомата с помощью генетического программирования в работе [4] потребовалось в среднем $220 \cdot 10^6$ вычислений функции приспособленности. Таким образом, с помощью предложенного алгоритма удалось найти решение задачи об «Умном муравье» в 8,3 раза быстрее, чем при использовании генетического алгоритма.

Заключение

Разработан метод построения управляющих конечных автоматов, основанный на муравьиных алгоритмах. Разработано программное средство на языке *Java*, реализующее предлагаемый метод. Метод был протестирован на задаче об «Умном муравье». При использовании модифицированной функции приспособленности, учитывающей число состояний автомата, удалось найти решение этой задачи в 8,3 раза быстрее, чем с помощью генетического алгоритма.

Преимущество предлагаемого подхода перед генетическим алгоритмом также состоит в том, что для решения каждой конкретной задачи не требуется определять функции мутации и скрещивания, что обычно является нетривиальной задачей.

Исследование поддержано в рамках Федеральной целевой программы «научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы».

Литература

1. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. – СПб: Питер, 2009. – 176 с.
2. Spears W. M., Gordon D. F. Evolving finite-state machine strategies for protecting resources // Proceedings of the International Symposium of Methodologies for Intelligent Systems 2000. ACM Special Interest Group on Artificial Intelligence. – Springer-Verlag, 2000. – P. 166–175.
3. Царев Ф. Н. Метод построения автоматов управления системами со сложным поведением на основе тестов с помощью генетического программирования // Материалы международной научной конференции «Компьютерные науки и информационные технологии». – Саратов: СГУ, 2009. – С. 216–219.
4. Царев Ф. Н., Шалыто А. А. Применение генетического программирования для генерации автомата в задаче об «Умном муравье» // Сборник трудов IV-ой Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – Т. 2. – С. 590–597.
5. Александров А. В., Казаков С. В., Сергушичев А. А., Царев Ф. Н., Шалыто А. А. Генерация конечных автоматов для

управления моделью беспилотного самолета. / Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики, 2011, № 2 (72). С. 3–11.
6. Lucas S. M. Evolving finite state transducers: Some initial explorations. Genetic Programming // Lecture Notes in Computer Science. – Berlin: Springer, Heidelberg, 2003. – V. 2610. – P. 241–257.
7. Лобанов П. Г. Использование генетических алгоритмов для генерации конечных автоматов. Дисс. канд. тех. наук: 05.13.11. – СПбГУ ИТМО, 2008. – 114 с.
8. Егоров К. В., Царев Ф. Н. Совместное применение генетического программирования и верификации моделей для построения автоматов управления системами со сложным поведением // Сборник докладов конференции молодых ученых и специалистов «Информационные технологии и системы». – М.: ИППИ РАН, 2009. – С. 77–82.
9. Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms // Ph. D. thesis. – Politecnico di Milano. Italy, 1992. – 140 p.
10. Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization. – MIT Press, 2004. – 305 p.
11. Dorigo M., Gambardella L.M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 1997. – V. 1. – № 1. – P. 53–66.
12. Baker J.E. Reducing Bias and Inefficiency in the Selection Algorithm / In Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms and their Application, Hillsdale, New Jersey, USA: Lawrence Erlbaum Associates, 1987. P. 14–21.