

О Т З Ы В  
официального оппонента

на диссертацию Н.Г. Кушик «Методы выделения подклассов конечных автоматов с пониженными оценками сложности умозрительных экспериментов», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации»

Диссертация посвящена решению задач анализа и синтеза конечных автоматов. Сама по себе актуальность этой темы не требует какого-то специального объяснения: на решение этих задач в течении нескольких десятилетий направлены усилия многих исследователей и разработчиков, опубликовано большое количество научных и практических работ. Конечные автоматы являются широко распространённым, удобным и адекватным математическим формализмом для описания дискретных программных и аппаратных систем. На практике анализ и синтез автоматов используются для проверки функциональных и нефункциональных требований к таким системам. А необходимость такой проверки очевидно следует как из повсеместного использования программного и аппаратного обеспечения, бурного роста его количества и сложности, так и, к сожалению, практической неизбежности наличия в нём ошибок, подчас критических.

В то же время методы решения указанных задач часто оказываются практически неприменимы, поскольку требуют слишком больших (экспоненциально зависящих от размера автоматной модели) ресурсов по времени и/или памяти. Отсюда вытекает уточнение темы диссертационной работы: понижение сложности алгоритмов с экспоненциальной до полиномиальной. Автор предлагает решать эту проблему с помощью выделения подклассов конечных автоматов, для которых можно разработать алгоритмы полиномиальной сложности. Естественно, предполагается, что такие подклассы будут иметь практическую ценность, т.е. в них будут попадать автоматные модели многих программных и аппаратных систем, используемых на практике.

Диссертационная работа Н.Г. Кушик выполнена на строгом математическом уровне с использованием понятий и методов теории автоматов и формальных языков, теории графов, теории алгоритмов и комбинаторики. В тексте диссертации сформулированы и доказаны 18 теорем, 8 лемм и 46 утверждений, а также 15 следствий из них, описан 21 алгоритм. Работа хорошо структурирована, она состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 128 единиц. Первая глава содержит основные определения и обозначения, используемые далее по тексту. Научные результаты, полученные автором, описываются в следующих трёх главах. В последней главе рассматриваются примеры практического использования исследованных моделей и соответствующих задач анализа. Заключение подводит итоги, перечисляя основные результаты работы и намечая перспективы дальнейших исследований.

В первой главе приводятся формальные определения конечного автомата и его свойств, по которым автоматы делятся на инициальные или неинициальные, полностью или частично определенные, детерминированные или недетерминированные, а последние – на наблюдаемые или ненаблюдаемые. Определяются отношения эквивалентности, делимости и  $r$ -совместимости автоматов, и операции над автоматами: пересечение и прямая сумма. Термин «полуавтомат» автор использует в том случае, когда символы, которыми помечены переходы, не разделяются на входные и выходные и, кроме того, выделено подмножество финальных состояний. Эксперименты с автоматами и полуавтоматами разделяются на различающие, установочные и синхронизирующие, используемые в задачах анализа, и проверяющие и распознающие, используемые в задачах синтеза, т.е., фактически, при тестировании. Также различаются безусловные и адаптивные (условные), простые и кратные эксперименты.

Метод построения основных глав (2, 3 и 4) напоминает древнекитайский метод классификации и изучения вещей. Этот метод заключается в построении своеобразной матрицы мира, систематизирующей явления по набору признаков, а далее – в заполнении клеточек матрицы соответствующими результатами исследований. Автор выполняет обзор известных методов решения задач анализа и синтеза автоматов в соответствии с типами автоматов и типами экспериментов. В полученной матрице остаются пустые клеточки – это нерешённые проблемы. Вот как раз в систематическом заполнении, пусть не всех, но существенной части этих пустых клеточек, т.е. в решении соответствующих проблем и заключается основное научное содержание работы.

Наиболее наглядно это видно во второй главе, посвященной безусловным экспериментам с конечными автоматами. Приводятся три таблицы: 1) для полностью определенных детерминированных автоматов и полуавтоматов, 2) для частично определенных детерминированных автоматов и полуавтоматов и 3) для полностью определенных недетерминированных автоматов и полуавтоматов. Таблица 1 заполнена полностью результатами работы предыдущих исследователей. В таблице 2 остаются две пустые клеточки: неизвестны результаты для установочных последовательностей. Таблица 3 содержит три пустых клеточки: одна из них уже была заполнена в кандидатской диссертации автора (максимальная длина установочной последовательности), а две другие (сложность задачи проверки существования разделяющей и установочной последовательностей) – в последующих работах автора. Все эти три результата приведены во втором разделе второй главы.

Третья глава посвящена адаптивным экспериментам. Адаптивность эксперимента позволяет в ряде случаев снизить сложность. К сожалению, эта глава (как и следующая глава 4) не содержит столь же наглядных таблиц, как глава 2, но принцип «заполнения клеточек» выдерживается и здесь. Автором предложены методы синтеза адаптивных различающих и установочных экспериментов с полностью определенными недетерминированными автоматами, показана достижимость экспоненциальной сложности различающего эксперимента и в то же время определены классы автоматов с полиномиальной сложностью проверки существования установочного или различающего экспериментов, а также введено понятие адаптивного синхронизирующего эксперимента для наблюдаемого автомата и определен подкласс автоматов с полиномиальной сложностью проверки существования такого эксперимента и самого эксперимента.

Четвертая глава продолжает «заполнение клеточек» для проверяющих экспериментов, которые основаны на той или иной модели неисправностей. Такая модель в общем случае задаётся спецификацией, отношением конформности и множеством неисправных автоматов. Предложен метод синтеза безусловных проверяющих экспериментов для полностью определенной ненаблюдаемой инициальной недетерминированной спецификации и отношения неразделимости в качестве отношения конформности. Если спецификация имеет особый вид (дерево, в каждом нетупиковом состоянии которого определены переходы по всем входным символам), то задача проверки существования кратного проверяющего эксперимента решается за полиномиальное время. Также определены два класса моделей неисправностей с отношением  $r$ -совместимости в качестве отношения конформности, для которых задача проверки существования кратного адаптивного проверяющего эксперимента решается за полиномиальное время.

Хорошие докторские диссертации бывают двух типов: «вертикальные» и «горизонтальные». «Вертикальная» работа решает достаточно узкую, но очень важную и трудную (и, возможно, широкую по своим последствиям) проблему, осуществляя своего рода прорыв в этом узком направлении. «Горизонтальная» работа – это как итог многих исследований, она посвящена решению целого круга связанных между собой проблем так, что решение каждой из этих проблем могло бы составить тему отдельной кандидатской диссертации. В такой работе важна именно систематичность подхода, общая методология,

позволяющая решить не одну, а ряд проблем по принципу «заполнения клеточек китайской матрицы». Важны работы обоих типов: каждая «вертикаль» должна впоследствии обрести своей «горизонталью», чтобы подытожить все последствия прорыва, «выровнять» широкий фронт научных исследований и подготовить почву для последующих «вертикалей». Диссертация Н.Г. Кушик, мне кажется, относится как раз к такому «горизонтальному» типу, что демонстрируется содержанием и результатами трех основных глав (2, 3 и 4).

К диссертационным работам в области компьютерных наук традиционно предъявляется ещё и требование практической полезности. Выполнение этого требования Н.Г. Кушик наглядно демонстрирует в последней, пятой главе диссертации. Здесь рассматриваются технические приложения, в которых могут быть эффективно использованы эксперименты с конечными автоматами. Приводятся результаты компьютерных экспериментов по оценке эффективности некоторых методов и подходов, предложенных в диссертации. Это синтез проверяющих экспериментов для реализации протокола IRC, для которого показано, что при некотором упрощении модели неисправности полученный кратный проверяющий эксперимент позволяет обнаруживать ошибки и несоответствия в доступных реализациях протокола. Предлагается метод оценки качества интерактивных сервисов на основе расширенных автоматов, полученных посредством проведения умозрительных экспериментов с действующей реализацией данного сервиса. Также предлагается метод оценки качества веб/мультимедиа/электронных сервисов на основе анализа и обучения автоматов с одним состоянием, эффективно представленных подходящими логическими схемами. Экспериментальное сравнение подхода на основе логических схем с подходом, основанным на формулах нечеткой логики, подтвердил более высокую производительность первого подхода и примерно одинаковую их способность к предсказанию удовлетворенности конечного пользователя. Наконец, предложен метод синтеза кратных проверяющих экспериментов для Verilog-описаний без явного извлечения переходов соответствующей автоматной модели, что важно для практики.

Основные результаты диссертационной работы можно сгруппировать следующим образом.

1) Для безусловных экспериментов с полностью определенными наблюдаемыми недетерминированными автоматами: получены оценки сложности задач проверки существования различающего и установочного экспериментов.

2) Для адаптивных экспериментов с полностью определенными наблюдаемыми недетерминированными автоматами: предложены методы синтеза различающего и установочного экспериментов, доказана достижимость экспоненциальной оценки различающего эксперимента, определены подклассы автоматов, для которых задача проверки существования установочных и различающих экспериментов и сам эксперименты имеют полиномиальную сложность, введено понятие условного синхронизирующего эксперимента и предложен метод синтеза такого эксперимента (если такой эксперимент существует), определен подкласс автоматов, для которых задача проверки существования синхронизирующего эксперимента и сам эксперимент имеют полиномиальную сложность.

3) Для кратных проверяющих экспериментов с полностью определенными ненаблюдаемыми недетерминированными инициальными автоматами: предложен метод синтеза эксперимента с гарантированной полнотой, определены модели неисправности, для которых существует эксперимент с гарантированной полнотой полиномиальной длины.

4) Проведено экспериментальное исследование практической применимости конечных автоматов и рассмотренных экспериментов с ними для проверки функциональных и нефункциональных требований к компонентам телекоммуникационных систем.

Как уже отмечалось, работа выполнена на строгом математическом уровне, хорошо структурирована, написана понятным языком. Достоинством работы является также то, что каждая глава и раздел состоят не только из формальной части; автор дал себе труд, во-первых, напоминать читателю основные используемые дальше понятия на неформальном уровне, что очень помогает чтению текста, во-вторых, ясно и четко формулировать обсуждаемые проблемы и идеи их решения, в-третьих, делать нужные выводы из полученных результатов.

Тем не менее, диссертация не свободна от некоторых недостатков, некоторые из которых имеет смысл перечислить:

1) Работа традиционно содержит ошибки в знаках препинания, согласованности падежей и пр. В ряде случаев встречается пропуск слова или, наоборот, лишнее слово.

2) На стр. 87 опечатка: вместо « $S$ » должно стоять « $S_m$ ».

3) На стр. 69 написано «стоковое состояние *sink*», а на стр. 71 в состоянии *sink* определяется переход-петля, что противоречит общепринятому определению стока как вершины ориентированного графа с нулевой полустепенью исхода.

4) На стр.175 при обсуждении предположения о всех погодных условиях написано: «При этом предполагается, что тестер «знает», какие «погодные условия» нужно реализовать для наблюдения требуемых выходных реакций». На самом деле, предположение о погодных условиях не предполагает такого «знания». Здесь, конечно, есть проблема: без дополнительных гипотез тестер ни в какой момент времени не может «знать», все выходные реакции получены или ещё не все. Но эти гипотезы не часть предположения о погодных условиях, а дополнительные к нему.

5) Два разных утверждения идут под одним и тем же номером «4.11»: на стр. 196 и на стр. 199.

Ещё одно замечание касается позиционирования работы, которое, на мой взгляд, проведено недостаточно широко, учитывая сегодняшние реалии научного мира. Только в заключении автор упоминает о тестировании с открытым состоянием, т.е. с возможностью наблюдения текущего состояния реализации, хотя такая возможность позволяет существенно снизить сложность задач, о чём автор также указывает в заключении. Также только в заключении упоминаются другие отношения конформности, в частности, конформности типа *isco*, основанные на возможности наблюдения отказов как отсутствия ожидаемых реакций. Наконец, только в заключении упоминаются неклассические автоматные модели и сети автоматов. Всё это автор справедливо относит к направлениям дальнейших исследований, но дело в том, что такие исследования происходили раньше и происходят сейчас в параллель с исследованиями в той области, которой посвящена диссертация. Поэтому, на мой взгляд, упоминание таких тестовых возможностей, конформностей и моделей имеет отношение и к позиционированию работы. Отчасти это упущение можно объяснить и извинить тем, что тематика диссертационной работы – одна из самых классических в анализе и верификации автоматных моделей, и её проблематика в значительной степени «устоялась», что, конечно, не означает, что все эти проблемы решены, о чём и свидетельствует данная работа.

Тем не менее, указанные недостатки, не снижают научной и практической ценности диссертации.

В целом следует отметить, что диссертация Н.Г. Кушик является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области теории автоматов. Выделение классов автоматов с пониженными оценками сложности умозрительных экспериментов имеет важное теоретическое и практическое значение. Результаты работы имеют также и педагогическое значение, поскольку могут быть использованы в курсах лекций по теории автоматов, теории формальных моделей, верификации и тестированию.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается строгими доказательствами в тексте диссертации с применением аппарата дискретной математики, формальной логики, теории автоматов и комбинаторики. Возможность эффективного практического использования этих результатов для анализа и синтеза дискретных систем подтверждается посредством компьютерных экспериментов.

Результаты диссертационной работы опубликованы в многочисленных авторитетных, в том числе, международных изданиях; всего имеется 36 публикаций, в том числе 16 статей в изданиях, упоминаемых в списке ВАК. Эти результаты докладывались на многочисленных научных конференциях и семинарах, в том числе, международных.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Все результаты, выносимые на защиту, принадлежат соискателю.

Считаю, что диссертация Н.Г. Кушик соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации», а автор диссертации полностью заслуживает присуждения этой степени.

Официальный оппонент,  
старший научный сотрудник, доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Института системного программирования (ИСП РАН)

И.Б. Бурдонов

Подпись И.Б. Бурдонов заверяю  
Ученый секретарь ИСП РАН



Н.В. Пакулин

11 ноября 2016 г.

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт системного программирования Российской академии наук  
109004, г. Москва, ул. А. Солженицына, 25  
(495) 912-44-25, <http://www.ispas.ru>, [info-isp@ispas.ru](mailto:info-isp@ispas.ru)

Сведения о составителе отзыва:

Бурдонов Игорь Борисович, доктор физико-математических наук (05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей);  
Старший научный сотрудник (05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей);  
Ведущий научный сотрудник отдела «Технологии программирования», Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института системного программирования Российской академии наук.