

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Шабаны Ханан Магди Дарвиш
«Синхронизация частичных и недетерминированных автоматов:
подход на основе SAT-решателей»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.13.17 – теоретическая информатика.

Диссертационная работа Ханан Магди Дарвиш Шабаны посвящена изучению синхронизации конечных автоматов при использовании SAT-решателей. Теория конечных автоматов является одним из быстро и интенсивно развивающихся разделов математики, не только в силу ее многочисленных приложений, но и благодаря связям с другими областями математики, в частности, с абстрактной и линейной алгеброй и комбинаторикой. Рассматриваемый класс задач представляет большой теоретический и практический интерес. Актуальность темы диссертационной работы Ханан Шабаны обусловлена наличием как целого ряда приложений результатов, получаемых в этой области, так и наличием большого числа открытых проблем.

В работе рассматриваются два типа конечных автоматов: так называемые частичные детерминированные автоматы (ЧКА) и недетерминированные автоматы (НКА). Синхронизируемым называется детерминированный конечный автомат, для которого существует слово, называемое синхронизирующим, т.е. под действием которого все состояния переходят в одно какое-то состояние. Для ЧКА и НКА в совокупности рассматривается пять различных типов синхронизируемости: бережная синхронизируемость, точная синхронизируемость, D_1 -, D_2 -, D_3 -синхронизируемость. Для каждого из этих пяти вариантов задача проверки данного автомата на синхронизируемость оказывается PSPACE-полной (т.е. полной в классе таких задач, что объем занимаемой в ходе решения памяти полиномиален относительно величины входа) и существуют серии автоматов с неограниченно растущим числом состояний, для которых минимальная длина соответствующего синхронизирующего слова для автоматов данной серии экспоненциально зависит от числа состояний. Тем самым, рассматриваемые задачи безусловно являются важными и при этом труднорешаемыми.

В качестве основных результатов диссертации хочу отметить следующие:

1. Масштабируемые сведения задач о существовании синхронизирующего слова данной длины к задаче выполнимости булевых формул, т.е. использо-

вание SAT-решателей, и экспериментальное подтверждение их применимости для всех разновидностей синхронизации ЧКА и НКА.

2. Экспериментальные исследования бережной и точной синхронизируемости ЧКА и D_1 -, D_2 -, D_3 -синхронизируемости НКА.

3. Доказательство того, что для случайного частичного детерминированного автомата с n состояниями и одним неопределенным переходом вероятность точной синхронизируемости при $n \rightarrow \infty$ равняется $1 - O(\frac{1}{n})$, а вероятность бережной синхронизируемости растет намного медленней.

4. Нахождение длин кратчайших бережно синхронизирующих слов (как функций от числа состояний) для двух новых бесконечных серий медленно синхронизируемых ЧКА с двумя входными буквами и одним неопределенным переходом.

Совокупность полученных результатов о частичных детерминированных автоматах и недетерминированных автоматах является новым крупным научным достижением в дискретной математике и теоретической информатике. Решены открытые проблемы и предложены новые оригинальные методы их исследования, в том числе метод использования SAT-решателей в задачах такого рода.

Рассмотрим содержание работы по главам.

В главе 1 содержатся предварительные сведения.

Глава 2 посвящена синхронизации ЧКА. Рассмотрены две задачи распознавания: наличие бережно синхронизирующего слова данной длины (CSW) или точно синхронизирующего слова данной длины (ESW). Показано, что ответ ДА на входе каждой из задач получается тогда и только тогда, когда соответствующий набор кловов, т.е. дизъюнкций конечного множества переменных или их отрицаний, не содержащих одновременно переменную и ее отрицание, выполним. В заключение этой главы показано, как при помощи стандартных алгоритмов уменьшать количества используемых кловов.

Глава 3 представляет экспериментальные результаты по бережной и точной синхронизируемости ЧКА, полученные при применении SAT решателя MiniSat 2.2.0 к экземплярам задачи выполнимости булевых формул, кодирующим экземпляры задач CSW и ESW методом главы 2. Тем самым, продемонстрировано, что построенные сведения позволяют даже при использовании простейшего SAT-решателя и скромных вычислительных ресурсов находить кратчайшие синхронизирующие слова для всех разновидностей синхронизации частичных детерминированных автоматов в пределах до 100 состояний. Для каждого числа состояний генерировалась 1000 случайных автоматов.

Глава 4 посвящена синхронизации НКА. Рассмотрены задачи D_iW распознавания существования в данном НКА D_i -синхронизирующего слова, $i = 1, 2, 3$, и построено сведение задач D_iW , $i = 1, 2, 3$, к задаче выполнимости булевых формул. Основным результатом, как и в главе 2, являются теоремы, устанавливающие, что предложенные сведения решают поставленную задачу.

В главе 5 автор собрала экспериментальные результаты по синхронизируемости случайных НКА, полученные при помощи того же решателя. Рассмотрены равномерная и пуассоновская модели случайного НКА.

Отдельно отметим, что теоретическое исследование доведено до практической реализации, а именно разработано программное обеспечение для вычисления порога синхронизации для НКА и нахождения оптимального синхронизирующего слова для ЧКА, и автором получены два Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. В текст диссертации программные коды и наборы исходных данных не включены, они, как и дополнительные экспериментальные результаты, размещены в открытом доступе на сайте <https://github.com/hananshabana/SynchronizationChecker>.

В качестве недостатка диссертации отмечу отсутствие единого списка обозначений в начале или в конце работы и наличие некоторого количества опечаток. В частности, на стр. 123 в строке 2 снизу предложение начинается со строчной буквы. Отмеченные недостатки не снижают общей положительной характеристики работы, содержащей важные и полезные теоретические результаты, имеющие несомненное практическое применение.

Таким образом, в диссертационной работе Ханан Шабаны предложен абсолютно новый метод решения серии важных и актуальных задач, чем обусловлена научная новизна представленной диссертационной работы. Практическое значение работы состоит в полном и всестороннем исследовании рассматриваемых теоретических проблем, а также в разработке новых программ для ЭВМ и их экспериментальной апробации. Полученные результаты являются новыми, актуальными, достоверными, все материалы своевременно опубликованы в центральной печати в России и за рубежом и прошли всестороннюю квалифицированную апробацию. Система предложенных и доказанных автором теоретических положений несомненно является новым научным достижением в дискретной математике и теоретической информатике — построены и исследованы масштабируемые сведения задач о существовании синхронизирующего слова данной длины к задаче выполнимости булевых формул.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает основные результаты диссертации, которые являются новыми и с надлежащей полнотой опубликованы в ведущих научных рецензируемых журналах из списка ВАК и приравненных к ним. Содержание диссертации соответствует специальности, по которой она рекомендована к защите. Диссертационная работа Шабаны Ханан Магди Дарвиш «Синхронизация частичных и недетерминированных автоматов: подход на основе SAT-решателей» в целом является законченным научным достижением и соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней: в УРФУ, а ее автор, Шабана Ханан Магди Дарвиш, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.17 — теоретическая информатика.

16.06.2020г.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., доцент

Александр Эмилевич Гутерман

профессор кафедры высшей алгебры ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

guterman@list.ru, 8(495)-939-16-11, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, ГЗ МГУ, механико-математический факультет, каф. высшей алгебры

Подпись профессора А.Э. Гутермана заверяю:

Отдел кадров Механико-математического факультета МГУ

*Подпись подтверждаю. Начальник отдела кадров
(Соломова Т.А.)*



Отзыв официального оппонента Кабанова Владислава Владимировича
на диссертационную работу ШАБАНЫ Ханан Магди Дарвиш

«СИНХРОНИЗАЦИЯ ЧАСТИЧНЫХ
И НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АВТОМАТОВ:

ПОДХОД НА ОСНОВЕ SAT-РЕШАТЕЛЕЙ»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 05.13.17 – теоретические основы информатики

Конечные автоматы – это классическая и весьма полезная математическая модель дискретных динамических систем, возникающих во многих областях науки: теория кодирования, теория матриц, биология и биоинформатика, разработка и верификация компьютерных программ, роботика и искусственный интеллект, лингвистика и др. Такие системы обычно определяются конечным набором внутренних состояний и конечным набором правил переходов из одного состояния в другое под воздействием внешних входных сигналов. Эту систему очень удобно представлять в виде раскрашенного ориентированного графа, вершинами которого являются состояния системы, а дуги переходы из одного состояния в другое, с одной дугой каждого цвета из каждой вершины. Алгебраически, любой переход - это отображение множества состояний в себя, поэтому набор всех таких отображений является полугруппой преобразований (в действительности, моноидом преобразований). Такой подход интересен не только с практической точки зрения, но с успехом используется и в других разделах современной математики.

Надежность системы, моделируемой конечным автоматом, во многом зависит от возможности восстановить контроль над этой системой

при возникновении ошибок. Такая возможность есть, если автомат обладает свойством *синхронизации*, т.е. может быть переведен в исходное состояние из любого другого состояния с помощью некоторой последовательности входных сигналов, не зависящей от текущего состояния автомата и называемой *синхронизирующим словом*.

Синхронизируемые автоматы широко исследуются, начиная с 50-х годов прошлого века. В последние годы внимание исследователей привлекли системы, поведение которых известно лишь частично либо не может быть полностью смоделировано в рамках традиционного подхода. Прежде всего, это недетерминированные автоматы, для которых знание текущего состояния системы и входного сигнала недостаточно для определения состояния в следующий момент времени. Другой тип недетерминированных систем – частично детерминированные автоматы, в которых для некоторых состояний невозможна или нежелательна подача определенных входных сигналов. Для данных двух типов автоматов существуют различные понятия синхронизации, но для всех ранее встречавшихся в литературе вариантов синхронизации задача проверки данного частичного или недетерминированного автомата на синхронизируемость, а также задача поиска кратчайшего синхронизирующего слова являются вычислительно сложными, в отличие от случая детерминированных автоматов.

Классической вычислительно сложной проблемой является *задача выполнимости булевых формул* (the Boolean satisfiability problem или кратко SAT). Кстати, это была первая задача, для которой было доказано это свойство. По данному набору булевых формул, записанных в конъюнктивной нормальной форме, требуется определить, существует ли такое приписывание значений *Истина* и *Ложь* входящим в них переменным, что все формулы становятся истинными. Благодаря успехам последних лет в области разработки SAT-решателей, все большее распро-

странение получают исследования, в которых данная вычислительно сложная задача сводится к задаче выполнимости булевых формул. Решая полученную задачу SAT с помощью SAT-решателя, можно получить ответ и для исходной задачи.

В диссертации Х.М.Д.Шабаны каждая из решаемых задач, связанных с синхронизацией частичных и недетерминированных автоматов, кодируется как входная задача выполнимости булевых формул. Для каждой из рассматриваемых задач построено сведение к задаче SAT, выполнены вычислительные эксперименты, приведено сравнение этого подхода с ранее применяющимися методами. Экспериментальные данные проанализированы стандартными статистическими методами, а в ряде случаев диссертанту удалось дать теоретические обоснования подмеченных ей закономерностей.

Переходя к оценке полученных результатов, отмечу, прежде всего, что все результаты диссертанта являются новыми и представляют значительный научный интерес. Теоретические результаты снабжены детальными и выверенными доказательствами; корректность экспериментальных результатов подтверждается сопоставлением с экспериментальными данными, полученными альтернативными методами, а также анализом «предельных» случаев, когда исследуемые автоматы в некотором смысле приближаются к детерминированным. В целом, диссертационная работа Х.М.Д.Шабаны представляет собой глубокое и идейно цельное исследование по синхронизации частичных и недетерминированных автоматов, открывающее новые перспективы в этой важной области.

Изложена диссертационная работа подробно и достаточно аккуратно; тем не менее, есть некоторое (не слишком большое) число мест, в которых были бы уместны дополнительные пояснения. Например, для аппроксимации экспериментальных данных в главе 3, раздел 3.4.2, диссертант использует метод наименьших квадратов и получает для средней

длины бережно синхронизирующего слова почти полного автомата с n состояниями выражение, представляющее собой кубический многочлен от n . При этом не сказано, в каком классе функций искалось аппроксимирующее выражение – в классе многочленов или в каком-либо более общем классе? В том же разделе обсуждается аналогичная по смыслу величина, а именно, средняя длина точно синхронизирующего слова почти полного автомата с n состояниями, но про нее в диссертации сказано только, что она ведет себя сходным образом, а никакого аппроксимирующего выражения для этой величины не приведено. Вопрос о классе функций, из которых выбиралось аппроксимирующее выражение, возникает и применительно к экспериментальным результатам в главе 5, раздел 5.3.

Диссертация хорошо оформлена и иллюстрирована. Первые две трети работы практически свободны от опечаток и языковых погрешностей, но в последней трети они начинают появляться. Например, на с.110, строка 3 сверху, вместо *may be not sufficient* следовало сказать *may not be sufficient*. На с.111, строка 1 сверху, вместо *describes* должно быть *describe*. На той же странице в строке 8 снизу пропущен предлог *to* после слова *according*. Все эти замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Основные результаты диссертации были достаточно широко представлены на международных и региональных научных конференциях: на международной конференции *Groups and graphs, metrics and manifolds (G2M2, Екатеринбург, 2017)*, 50-й, 51-й и 52-й конференциях молодых ученых из серии *Современные проблемы математики (Кадниково, 2018, 2019, и Екатеринбург, 2020)*, причем на всех этих докладах мне удалось присутствовать и я могу подтвердить вызванный ими интерес и их высокое качество. Кроме этого были сделаны доклады на международной научно-практической конференции *Mathematical modeling, programming and*

applied mathematics (Великий Новгород, 2019) и 18-й международной конференции Mathematical optimization and operations research (Обуховское, 2019).

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации, а ее результаты являются новыми и с надлежащей полнотой опубликованными в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК и приравненных к ним. Содержание диссертации соответствует п.10 паспорта специальности 05.13.17. Диссертация Шабаны Ханан Магди Дарвиш соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» в УрФУ.

Исходя из вышеизложенного, Шабана Ханан Магди Дарвиш заслуживает ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник отдела алгебры и топологии

ФГБУН «Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского»

Уральского отделения Российской академии наук

Контактная информация:

Адрес: 620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 16,
Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН,
отдел алгебры и топологии
Email: vvk@imm.uran.ru, тел. +79122843847

В. В. Кабанов

28.06.2020

Ученый секретарь Института математики и механики им. Н.Н. Красовского, кандидат физико-математических наук



О.Н. Ульянов