

**Отзыв официального оппонента**  
о диссертационной работе Ефимова Алексея Андреевича  
«Оценки энергопотребления объёмных схем»,  
представленной на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.5 –  
математическая логика, алгебра, теория чисел и дискретная математика

**Актуальность темы диссертации**

Задача синтеза схем из функциональных элементов с учётом пространственного расположения компонентов имеет самое непосредственное отношение к проектированию интегральных схем – магистральному направлению развитию электроники с середины 20 века. Современные микросхемы имеют, как правило, многослойную структуру. Слои состоят из технологических элементов, в частности, из функциональных логических преобразователей, соединённых проводами, по которым распространяются электрические сигналы. Проводами также соединяются разные слои, позволяя сигналам выполнять «межслойные переходы».

Базовые модели схем – схемы из функциональных элементов, контактные, вентильные схемы – не учитывают пространственных ограничений. Поэтому результаты, связанные с эффективным синтезом такого рода схем, имеют ограниченное прикладное значение. Всякий раз требуется дополнительно решать задачу об эффективной укладке схемы в пространстве. Поэтому приблизительно с 1960-х гг. рассматриваются вычислительные модели схем с пространственными ограничениями: клеточные/объёмные, многомерные схемы, различные абстракции интегральных схем.

Для указанных моделей ставятся классические задачи синтеза булевых функций и операторов с целью минимизации разнообразных функционалов сложности, обычно связанных с размером, быстродействием или энергопотреблением схем. К настоящему времени накоплен достаточно большой запас результатов в области синтеза «пространственных» схем, хотя и не такой значительный, как в базовых моделях. Один из первых результатов в этом направлении получил А.Н. Колмогоров – он послужил стимулом для исследований в новой области. Важный вклад в теорию внесли советские учёные С.С. Кравцов, А.Д. Коршунов, Н.А. Шкаликова и их последователи. Параллельно теория развивалась на Западе (Ч. Лейзерсон, К. Томпсон, Ф. Препарата и др.) – для зарубежных исследований обычно характерна более практическая постановка задач.

В диссертационной работе рассматривается модель объёмных схем и изучается функционал сложности, который в разных работах называется мощностью, активностью или потенциалом. Потенциал определяется как число единиц на выходах элементов схемы. Потенциал можно усреднять на множестве входных наборов (средний потенциал) или рассматривать максимальное значение (максимальный потенциал). Это одна из мер сложности, отражающая энергопотребление реальных электронных схем. Порядок функции Шеннона сложности объёмных схем установил А.Д. Коршунов. Поведение



функции Шеннона потенциала подробно изучено Г.В. Калачёвым в модели плоских клеточных схем. Потенциал объёмных схем, судя по всему, ранее не изучался. Актуальность выполнения исследований в этом направлении никаких сомнений не вызывает. Полученные результаты могут представлять не только теоретический, но и практический интерес, применительно к проектированию интегральных схем.

### Новизна научных результатов

В диссертационной работе установлен порядок функций Шеннона как среднего, так и максимального потенциала объёмных схем, вычисляющих булевы  $(m,n)$ -операторы (системы из  $m$  функций  $n$  переменных), при слабых ограничениях на соотношение между  $m$  и  $n$ . В частности, задача решена в наиболее важном случае булевых функций ( $m=1$ ). При этом нижняя оценка доказывается в более общей форме – для частично определённых булевых операторов. Аналогичная задача решена в классе объёмных схем с ограничением на взаимное расположение выходов: выходы должны располагаться близко друг к другу. Это ограничение продиктовано практикой проектирования микросхем.

Все результаты являются новыми и составляют существенное продвижение в теории синтеза и сложности схем. Следует отметить, что непосредственный перенос известных результатов и приёмов рассуждений из модели плоских схем не приводит к успешному решению задачи в модели объёмных схем. Для работы в трёхмерном пространстве автору пришлось развить оригинальный математический аппарат, привлечь дополнительные соображения.

На мой взгляд, наиболее ценным вкладом диссертационной работы является нижняя оценка (среднего) потенциала булевых операторов и метод её доказательства (глава 2). Доказательство сочетает рассуждения из геометрии, теории меры, анализа и комбинаторики. В его основе лежит предложенный автором непрерывный вариант метода расслоения. Отмечу, что с методической точки зрения длинное (более 30 страниц) доказательство хорошо структурировано, а схема доказательства удачно проиллюстрирована на рис. 2.1.

### Замечания к диссертации

Стиль изложения материала, особенно во введении, к сожалению, не находится на высоком уровне, хотя то, что имеет в виду автор, как правило, понятно. Диссертация начинается заявлением (стр. 3): «Автор решает *эту* задачу [синтеза схем, вычисляющих булевы функции и операторы], разрабатывая *универсальные* методы синтеза схем и получая *фундаментальные* нижние оценки сложности схем, показывающие *оптимальность* применяемых методов». Это заявка на гораздо более значительный результат, нежели кандидатская диссертация, и она не соответствует действительности ни в одной из выделенных курсивом позиций без пояснений и оговорок, радикально сужающих смысл. Другие примеры:

стилистические:

- «Одной из основных моделей схем является *схема* из функциональных элементов» (стр. 3) Одна схема?



- «... Д. Маллер *посчитал* сложность булевой функции ...» (стр. 3) Разговорный и не подходящий по смыслу термин *посчитать* употребляется и далее, в частности, в сочетании «*подробно посчитаем*» (стр. 26, 31).

- «... потенциал ... равен значению количества единиц ...» (стр. 4) Несуразное выражение. Кроме того, термин *количество* в работе постоянно употребляется применительно к перечислимым объектам: элементам, контактам, узлам, выходам и пр. Хотя это и не явная ошибка, но элемент плохого стиля.

терминологические:

- «Кубическим элементом будем называть *булев оператор* ...» (стр. 9) Отождествление геометрического объекта и функции находится далеко за рамками (нередких в подобных случаях) допускаемых вольностей формулировок.

- Грани куба (кубического элемента) почему-то называются *сторонами*. (стр. 9) Более точно, сначала граням сопоставляются метки, а затем метки называются сторонами. Дальше, на стр. 10, оказывается, что стороны элемента являются *точками*! (В этом и в предыдущем случае, судя по всему, имеет место не критическое заимствование и неудачный перенос терминологии из работы предшественника – Г.В. Калачёва.)

- *Изолирующий* элемент не определён (стр. 10).

- Неудачное обозначение  $|v|$  для веса булева вектора  $v$ . (стр. 12) Эквивалентное (и общепринятое) обозначение используется для мощности множеств; далее обозначения в обоих смыслах используются вперемешку.

- На стр. 44  $t_i$  сначала определяется как интенсивность источника жидкости, а затем – как скорость жидкости.

смысловые:

- Странный факт сообщается на стр. 3: в 1958 г. О.Б. Лупанов решил задачу (об асимптотике схемной сложности булевых функций) в общем виде, для произвольного полного конечного базиса, а в 1963 г. получил следствие для частного случая (стандартного базиса). Как это понять: решение 1958 г. для частных случаев действительно или Лупанову понадобилось 5 лет, чтобы подставить в общую формулу параметры конкретного базиса?

- «... в работе [19], функция Шеннона равна  $\Theta(\dots)$  ...» (стр. 5) Значение функции Шеннона зависит от статьи или есть сомнения в справедливости результата?

Обращает на себя внимание предельно короткий для диссертации список цитируемой литературы: всего 24 работы других авторов. С одной стороны, это связано с небольшим числом теоретических исследований в области пространственных схем. Но с другой – автором опущен ряд относящихся к теме работ как отечественных (С.В. Грибок, Д.А. Жуков), так и зарубежных (А. Альбрехт, К. Томпсон, Ф. Препарата и др.) авторов. На пропуск многих работ указано ещё в отзывах официальных оппонентов о диссертации Г.В. Калачёва 2018 г., а в настоящей диссертации ситуация только усугубилась. Уж во всяком случае, недопустимо было игнорировать известную статью А.Н. Колмогорова и

Я.М. Бардзиня «О реализации сетей в 3-мерном пространстве» (Проблемы кибернетики. Вып. 19. 1967).

Хотя текст в некоторых отношениях написан недостаточно аккуратно, к математической составляющей работы претензий нет, и нет повода поставить под сомнение справедливость результатов диссертации.

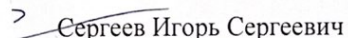
### **Заключение по диссертации**

Основные результаты диссертационной работы являются новыми, снабжены корректным теоретическим обоснованием. Они своевременно опубликованы в печатных работах автора, в том числе, в журнале, входящем в перечень изданий, рекомендованных для защит в диссертационных советах МГУ. Содержание автореферата с надлежащей полнотой отражает содержание диссертационной работы. Результаты диссертации прошли апробацию на нескольких научных конференциях и семинарах. Они могут быть востребованы специалистами, работающими в области теоретической кибернетики и проектирования интегральных схем.

Диссертационная работа «Оценки энергопотребления объёмных схем» отвечает всем требованиям пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в МГУ им. М.В. Ломоносова», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Считаю, что автор диссертации Ефимов Алексей Андреевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.5 – «математическая логика, алгебра, теория чисел и дискретная математика».

Официальный оппонент:

начальник лаборатории  
ФГУП «НИИ «Квант», д.ф.-м.н.

Сергеев Игорь Сергеевич

15 декабря 2023 г.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт «Квант»

Почтовый адрес: 125438, Москва, 4-й Лихачёвский пер., д. 15

Тел.: 8 (499) 745-92-65, электронный адрес: [iss@rdi-kvant.ru](mailto:iss@rdi-kvant.ru)

Подпись Сергеева Игоря Сергеевича заверяю.  
Начальник отдела кадров ФГУП «НИИ «Квант»