

## НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ

УДК 681.3

П.Н. Бибило, Ю.В. Поттосин, Л.Д. Черемисинова

## О НАУЧНОМ НАСЛЕДИИ ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА А.Д. ЗАКРЕВСКОГО

*Посвящается научному наследию Аркадия Дмитриевича Закревского, который стоял у истоков зарождения кибернетики в Советском Союзе и являлся основателем одной из самых известных школ логического проектирования в Советском Союзе и мире.*



В ноябре 2016 г. лаборатории логического проектирования Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси исполнилось 45 лет. Она была создана в 1971 г. доктором технических наук Аркадием Дмитриевичем Закревским под названием «лаборатория системного программирования и логического синтеза». Научные исследования, которыми руководил Аркадий Дмитриевич в этих двух областях науки, были начаты задолго до 1971 г., еще в Томском государственном университете.

**Начало научных исследований. Томский период**

Научную деятельность Аркадий Дмитриевич Закревский начал в середине XX в. с момента широкого распространения и бурного развития вычислительной техники в Советском Союзе. Тогда было налажено серийное производство электронных вычислительных машин «Урал», одна из которых была установлена в Томском государственном университете. Это была первая и в то время единственная ЭВМ в Сибири. Ознакомившись с устройством «Урала», А.Д. Закревский предложил свой вариант равносильной ЭВМ, обладающей в десятки раз меньшим количеством аппаратуры. Дело в том, что оперативная память «Урала» размещалась на магнитном барабане, который вращался со скоростью 6000 оборотов в минуту. За один оборот машина выполняла одну операцию: арифметическую или логическую. Арифметическое устройство работало по принципу параллельно-последовательного действия, требовавшему использования многорядного сумматора и многорядных регистров для хранения промежуточных результатов. Аркадий Дмитриевич предложил располагать упомянутые регистры на том же магнитном барабане и использовать принцип последовательного действия. Операции выполнялись бы за один оборот барабана, а для их выполнения достаточно было нескольких триггеров. Соответствующий проект был опубликован в статье [1], где для описания устройств широко применялся аппарат булевой алгебры. Студентам этот материал давался как пример использования булевых функций в проектировании дискретных устройств. Данный проект не был реализован, поскольку к тому времени появились более быстродействующие, надежные и компактные устройства оперативной памяти, чем магнитный барабан.

В основе элементной базы логических схем в то время лежали схемы, состоящие из полупроводниковых диодов и сопротивлений. Например, логические схемы упомянутой ЭВМ «Урал» насчитывали свыше тысячи полупроводниковых диодов. Статья [2] посвящена оптимизации таких схем. В ней описан метод, применение которого позволило заметно сократить число диодов в конкретной схеме.

С развитием вычислительной техники выросла потребность в использовании методов логического проектирования. Следует отметить широту охвата проблем логического проектирования в научных исследованиях А.Д. Закревского. Его работы 1960-х гг. посвящены довольно разнообразным задачам из этой области: теории автоматов, теории булевых функций, синтезу комбинационных схем в заданном базисе логических элементов, надежности логических схем, системному программированию. Многие из полученных результатов являются пионерскими, они не потеряли актуальности и оригинальности и в настоящее время.

**Оптимизация функциональных описаний логических схем.** В одной из первых работ Аркадия Дмитриевича [3] была решена задача минимизации булевых функций в классе дизъюнктивных нормальных форм, которая занимала центральное место в оптимизации комбинационных логических схем. Помимо, собственно, метода минимизации в статье предлагался инструментарий, который значительно облегчал восприятие булева пространства и позволял эффективно решать различные задачи, связанные с булевыми функциями. Систематизации построений в булевом пространстве, полезных при решении широкого класса логических задач, позднее была посвящена статья [4]. Особое место в задаче минимизации булевых функций занимало рассмотрение не полностью определенных функций. Ранее проблема их использования в практике логического проектирования в советской и зарубежной литературе практически не обсуждалась. В работе [5] предложен метод минимизации слабо определенных функций, т. е. функций, значения которых заданы на небольшой части булева пространства. В отличие от общего подхода к минимизации не полностью определенных функций предложенный метод частично избавлял от рассмотрения обширной области булева пространства, где значения функции не определены.

Значительным вкладом в теорию логического проектирования стали работы А.Д. Закревского по методам решения оптимизационных задач синтеза последовательностных схем. Предложенный метод последовательных сокращений для решения задачи минимизации числа состояний конечного автомата [6] позволял получить автомат, реализующий исходный автомат с числом состояний, близким к минимальному, а во многих случаях и равным ему. При этом затраты времени на реализацию данного метода оценивались полиномом третьей степени от числа состояний исходного автомата. Идея использовать модель конечного автомата для разложения сложного процесса проектирования управляющей системы на относительно простые действия [7] представляла собой огромный шаг на пути автоматизации проектирования.

**Решение логико-комбинаторных задач.** Значительное место в научном наследии А.Д. Закревского занимала проблема формализации и решения логико-комбинаторных задач, имеющих приложение в логическом проектировании и дискретной математике в целом. Методика решения (и программирования) таких задач, основанная на сокращении перебора вариантов при решении, изложена в статье [8]. В частности, одна из обширного списка рассмотренных логико-комбинаторных задач о покрытии, к которой сводятся многие оптимизационные задачи дискретной математики, была сформулирована на абстрактном уровне [9] и были даны алгоритмы ее решения в различных постановках [10].

Перечисленные работы в дальнейшем образовали алгоритмическую базу для создания автоматизированных систем логического проектирования.

**Надежность логических схем.** Не осталась без внимания А.Д. Закревского и проблема надежности логических схем. Метод повышения надежности логических схем представлен в статье [11], где предложено использовать результаты техники передачи сигналов без потери информации при наличии помех в канале связи. При этом небольшое усложнение схемы позволило обеспечить ее устойчивость к одиночным неисправностям.

Аркадий Дмитриевич также предложил общий подход к логическому проектированию схем, преобразующих информацию в коде Хэмминга, в рамках которого была решена задача синтеза многовыходных логических схем, функционально-устойчивых относительно выхода из строя подсхем, реализующих отдельные функции. При решении этой задачи впервые был применен помехоустойчивый код Хэмминга. Для случая контактных схем разработаны методы синтеза схем, продолжающих исправно функционировать при ложных замыканиях отдельных контактных пар.

Еще в конце 1950-х гг. А.Д. Закревский заинтересовался проблемами криптографии. Его статья, где был описан подход, использующий теорию автоматов для решения задач шифрования сообщений, не была в то время опубликована, так как представленные в ней результаты объявили «совершенно секретными». Однако именно она дала начало научному направлению, которое с тех пор развивается в Томском университете. Статья [12] была опубликована после снятия грифа секретности.

**Автоматизация логического проектирования.** В середине XX в. работы по автоматизации логического проектирования часто сводились к созданию специализированных вычислительных устройств, реализующих некоторые конкретные алгоритмы логического синтеза. По сравнению с универсальными ЭВМ такие устройства являются более эффективными, но не обладают возможностью варьирования параметров этих алгоритмов. В работе [13] высказана идея совмещения достоинств специализированных логических машин с преимуществами программного управления универсальной ЭВМ путем создания к ней специальной приставки. Приставка была названа *L*-машиной, а система «универсальная ЭВМ плюс приставка» – *L*-системой. Программа для *L*-системы, названная *L*-программой, состояла из команд двух видов: *U*-команды, реализуемой непосредственно на ЭВМ, и *L*-команды, реализуемой с помощью *L*-машины. Основными объектами, операции над которыми должны производиться на *L*-машине, считались булевы функции, и пространством их представления было принято множество вершин многомерного булева гиперкуба. Конструктивно *L*-машина состояла из блока управления, предназначенного для управления реализацией *L*-команд на *L*-машине, и блока многомерных полей, совмещающего функции хранения и преобразования информации. Структура многомерного поля подобна булеву гиперграфу, и каждое такое поле способно хранить информацию о булевой функции. Одно из многомерных полей, названное основным, играло роль сумматора, подобного сумматору одноадресной ЭВМ. На нем выполнялись *L*-команды и фиксировался результат. В качестве примера приведено решение задачи декомпозиции булевой функции на *L*-машине. Моделирование *L*-системы на универсальной ЭВМ доказало ее эффективность.

Однако увеличение быстродействия и возможностей памяти ЭВМ показало, что более перспективным направлением, чем создание специализированных машин и приставок, являлась разработка специализированных языков программирования для универсальных ЭВМ. Такой язык, язык ЛЯПАС (Логический Язык Представления Алгоритмов Синтеза), и был предложен А.Д. Закревским. В своей первой монографии [14] он описал этот язык и показал его возможности на примерах описаний алгоритмов решения разнообразных задач синтеза дискретных автоматов. Позже был издан сборник статей [15], описывающих сам язык ЛЯПАС, его реализацию на ЭВМ и серию алгоритмов решения задач логического проектирования. Кроме Аркадия Дмитриевича авторами статей являлись и его ученики. Сборник был переведен на английский язык и издан за рубежом [16], что свидетельствует о мировом признании научного направления, открытого А.Д. Закревским.

### Научные исследования. Минский период

В 1971 г. доктор технических наук А.Д. Закревский и группа его учеников переехали в Минск, где 26 ноября 1971 г. в Институте технической кибернетики АН БССР была организована лаборатория системного программирования и логического синтеза. В 1972 г. Аркадий Дмитриевич избирается членом-корреспондентом АН БССР. С 1971 по 2014 г. им были опубликованы 24 монографии.

**Автоматизация синтеза дискретных автоматов.** В Минске Аркадий Дмитриевич продолжил заниматься теоретическими вопросами автоматизации проектирования дискретных управляющих устройств. Монография «Алгоритмы синтеза дискретных автоматов» [17] явилась фундаментальным научным трудом, где был предложен и развит комплексный подход к проблеме автоматизации проектирования дискретных устройств, основанный на формализации задач и раскрытии их логико-комбинаторной природы, разработке точных и приближенных алгоритмов и программ решения задач теории графов, минимизации булевых функций, а также анализа и синтеза конечных автоматов. В книге описан и язык ЛЯПАС, ориентированный на проблемную область автоматизации проектирования дискретных устройств, приведены

тексты программ на данном языке, составившие библиотеку базовых программ решения комбинаторных задач логического проектирования. Книга стала своеобразным «источником задач» для многочисленных учеников А.Д. Закревского, которые продолжили развитие его идей и довели их до практического использования. Результатом коллективной работы явилась монография под редакцией Аркадия Дмитриевича «Синтез асинхронных автоматов на ЭВМ» [18], посвященная описанию системы «Автомат-74» и реализованным в ней методам проектирования.

Система «Автомат-74» была одной из первых в СССР систем сквозного проектирования конечных автоматов, в которой использовался классический подход к синтезу логических схем, реализующих дискретные (конечные) автоматы. Основные этапы этого подхода:

- минимизация числа состояний полностью и частично определенных автоматов;
- противоположное кодирование состояний и получение булевых функций возбуждения элементов памяти (триггеров);
- совместная минимизация систем булевых функций в классе дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ);
- построение логической схемы в базисе элементов И–НЕ, И–ИЛИ–НЕ;
- разбиение и покрытие схемы логическими элементами серии К133 малой степени интеграции.

Система была реализована при помощи программирующей системы ЛЯПАС-71 на ЭВМ М-222. Исходные данные вводились с перфокарт, программы выполнялись по модулям согласно этапам синтеза, диалог отсутствовал, результаты промежуточных вычислений выдавались на печать. Классические методы Квайна – МакКласки минимизации булевых функций были развиты для случая совместной минимизации систем не полностью определенных (частичных) булевых функций. Оптимизация логических схем осуществлялась на основе факторизации логических выражений, задающих совместно минимизированные ДНФ.

**Решение логических уравнений.** Основной вклад создателя лаборатории логического проектирования в логику отражает монография «Логические уравнения» [19] (1975). Здесь проведена классификация и разработаны методы решения логических уравнений из выделенных классов, предложен комбинаторный подход к решению уравнений и компактному представлению множества всех корней логических уравнений, заданных в форме ДНФ, на основе которого разработаны практические методы быстрого поиска одного, всех или заданного числа корней. В книге рассмотрены как тривиальные методы решения уравнений, так и методы перемножения ДНФ, лексикографического перебора, минимизации дерева поиска, основанные на сокращенном переборе аргументов и уравнений системы, локальной редукции, метод «отраженных волн» и распространения констант и др. Классическими задачами, основанными на решении уравнений частного вида в виде ДНФ и конъюнктивных нормальных форм (КНФ), являются задачи анализа булевой матрицы на вырожденность минимизации булевых функций и проверки выполнимости КНФ, которые лежат в основе основных подходов к формальной верификации логических схем. Решение последней задачи настолько важно в настоящее время, что регулярно проводится чемпионат мира между эффективными программами решения задач выполнимости КНФ большой размерности. В книге представлены также полисиллогизмы – суждения, содержащие более двух посылок. Заметим, что полную систему силлогизмов описал Аристотель, это и составило основное содержание логики, изучавшейся на протяжении двух тысячелетий в университетских курсах.

Логические уравнения оказались удобной формальной моделью, пригодной для решения разнообразных задач. К решению таких уравнений в лаборатории логического проектирования были сведены задачи декомпозиции булевых функций и систем функций, при этом различные виды декомпозиции потребовали учета различных логических условий. Сюда можно отнести и задачи минимизации площади транзисторных структур с разрывами шин, технической диагностики и другие из многих проблемных областей.

**Решение больших систем логических уравнений.** В более поздних работах А.Д. Закревского был выделен класс больших систем логических уравнений (БСЛУ), который имел большое практическое значение для решения задач проектирования, диагностики, распознавания, защиты информации и др. БСЛУ в монографии «Решение больших систем логических уравнений» [20] (2009) характеризуются сотнями переменных и тысячами уравнений. Важной их осо-

бенностью является то, что каждое из уравнений содержит относительно небольшое число (не более десятка) переменных. Данное ограничение позволило предложить оригинальные высокоэффективные методы решения БСЛУ, в основе которых лежат минимизация дерева поиска, сокращенный перебор аргументов и уравнений системы, распространение констант, силлогизмы, коллапсирование уравнений, локальная редукция и др. Выделен практически важный подкласс БСЛУ с малым числом корней. Разработаны методы решения типичных для диагностики и распознавания задач проверки системы на выполнимость, нахождения единственного корня системы.

Приведена классификация систем линейных логических уравнений (СЛЛУ), и решены для них две трудные и практически важные задачи: нахождения кратчайшего решения неопределенной СЛЛУ и общего корня максимального числа уравнений противоречивой системы. Разработана серия эффективных методов их решения, обобщающих метод Гаусса канонизации системы путем рандомизированного построения множества эквивалентных канонических форм, решаемых параллельно, что обеспечивает снижение уровня перебора и сокращение времени решения на несколько порядков. Показана эффективность предложенных методов для криптоанализа машины Hagelin M-209, используемой немцами во время Второй мировой войны. Отдельно изучался класс линейных логических уравнений. Предложенные методы решения БСЛУ были реализованы программно, проведено экспериментальное исследование программ, подтвердившее их высокую эффективность.

**Автоматизация программирования.** В 1970–1980-е гг. на базе предложенного А.Д. Закревским языка ЛЯПАС были разработаны языки ЛЯПАС-71 и ЛЯПАС-М, которые содержали более развитые системы команд. Они легли в основу высокоэффективных по компактности и быстродействию систем программирования, реализованных для отечественных ЭВМ типа БЭСМ-6, СМ-4, «Минск-32», ЭВМ серии ЕС и ПЭВМ ЕС-1840. Монография «Система программирования ЛЯПАС-М» [21] зафиксировала новый стандарт ЛЯПАС-М, сменивший вторую версию языка – ЛЯПАС-71. В языке ЛЯПАС-М символика была приближена к стандартным алфавитам отечественных устройств отображения информации, включены новые операции над символами и двухмерными логическими массивами, названными комплексами. Созданные программирующие системы ЛЯПАС-М для ЭВМ серии ЕС содержали развитый набор программных средств, достаточных для разработки сложных комплексов автоматизации проектирования.

Следует отметить, что язык ЛЯПАС продолжает развиваться в Томском государственном университете, опубликовано описание новой версии ЛЯПАС-Т, заключающейся в увеличении длины операндов и расширении множества элементарных операций над ними.

**Логическое проектирование.** Развитие микроэлектроники привело к появлению сверхбольших интегральных схем (СБИС) и вызвало широкое применение в 1990-е гг. регулярных матричных структур, в частности программируемых логических матриц (ПЛМ), реализующих системы ДНФ булевых функций. ПЛМ выпускались в виде отдельных микросхем и применялись в качестве макроэлементов в составе заказных СБИС. Основы проектирования дискретных устройств на базе ПЛМ были заложены А.Д. Закревским в монографии «Логический синтез каскадных схем» [22], где он предложил матричный аппарат, впервые сформулировал и решил многие задачи анализа, синтеза и диагностики матричных схем. Критериями оптимизации при синтезе схем в базисе ПЛМ( $t, q, s$ ) с ограниченными параметрами ( $t, s$  и  $q$  – числа входных, выходных полюсов и промежуточных шин соответственно) являлись сложность (число микросхем) и быстродействие схемы. При реализации ДНФ функции с числом  $n$  входных,  $m$  выходных переменных и  $k$  конъюнкциями на ПЛМ с ограниченными параметрами учет ограничений  $k \leq q, m \leq s$  достаточно просто осуществлялся с помощью декомпозиций «по промежуточным шинам» и «по выходам». При этом использовались возможности монтажной логики («проводного» ИЛИ) для выходных полюсов микросхем. Декомпозиция «по промежуточным шинам» сводилась к дизъюнктивному разложению системы ДНФ (или системы булевых функций в общем случае), а декомпозиция «по выходам» – к разбиению системы функций на подсистемы с ограниченным числом функций.

В монографии [22] предложены новые виды декомпозиции систем ДНФ: стандартная, комбинированная, параллельная, матричной факторизации, группирования ортогональных конъюнкций. На их основе разработаны декомпозиционные методы синтеза одноярусных и многоярусных сетей в базе элементарных матричных схем и ПЛМ. Построение одноярусных схем возможно для систем ДНФ с короткими термами, длина которых не превышает число  $t$  входных полюсов ПЛМ.

Синтез одноуровневых схем в базе ПЛМ представляет собой сложную комбинаторную задачу покрытия матриц  $T^x$ ,  $B^f$ , задающих систему ДНФ( $n, k, m$ ) множеством  $k$  конъюнкций, соответствующих  $k$  строкам  $n$ -столбцовой троичной матрицы  $T^x$ , и распределением конъюнкций по ДНФ системы, задаваемым  $m$  столбцами  $k$ -строчной булевой матрицы  $B^f$ . Пара матриц покрывается парами подматриц  $T_i^x$ ,  $B_i^f$  ограниченных размеров. Так, матрица  $T^x$  покрывается подматрицами  $T_i^x$ , имеющими не более  $t$  столбцов и не более  $q$  строк; матрица  $B^f$  – подматрицами  $B_i^f$ , имеющими не более  $s$  столбцов и соответствующее  $T_i^x$  число строк. Подматрицы каждой пары формируются на одном и том же множестве строк матриц  $T^x$ ,  $B^f$ , и каждая подматрица  $T_i^x$ ,  $B_i^f$  определяет одну ПЛМ( $t, q, s$ ) строящейся сети.

В том случае когда система ДНФ не удовлетворяла условию одноярусной реализации (длина некоторых конъюнкций превышала число  $t$  входных полюсов ПЛМ), синтез сети из ПЛМ сводился к задаче построения многоярусных сетей, решаемой на основе декомпозиции по входам «большой» ПЛМ, соответствующей реализуемой системе ДНФ. Для этого случая, в частности, был предложен оригинальный метод тождественных отображений в пространстве промежуточных переменных. Особенностью данного метода является то, что исходная «большая» ПЛМ разбивается на две взаимосвязанные ПЛМ, одна из которых (первая от входов сети) имеет  $t$  входов и, следовательно, удовлетворяет условию реализации одноярусной сетью базовых ПЛМ с ограниченными параметрами, а вторая не удовлетворяет и должна быть, в свою очередь, декомпозирована аналогичным путем. Метод тождественных отображений позволяет итеративным способом строить сети из элементов с ограниченным числом входов. В этом методе получение промежуточных переменных разложения сведено к комбинаторной задаче кодирования интервалов таким образом, что пересекающиеся части интервалов были закодированы ортогональными кодами.

Содержание данной фундаментальной монографии не исчерпывалось построением сетей ПЛМ. В ней были рассмотрены также методы минимизации площади одной ПЛМ, реализуемой в виде макроэлемента, причем исходное описание представляло собой систему полностью определенных, частичных (не полностью определенных) булевых функций, заданных на наборах и интервалах значений входных переменных. Рассмотрены проблемы комбинаторного поиска, минимизации систем и реализации на ПЛМ дискретных устройств, заданных моделями секвенциальных и микропрограммных автоматов, а также проблемы диагностики матричных схем.

**Логическое распознавание.** Одним из направлений деятельности лаборатории, которой руководил А.Д. Закревский, наряду с логическим проектированием являлось логическое распознавание. Основные результаты по этой теме отражены в монографии «Логика распознавания» [23] (1988). Здесь излагается логический подход к проблеме распознавания в пространстве дискретных признаков, использующий общий аппарат для индуктивного вывода на этапе извлечения знаний из данных и дедуктивного вывода на этапе предсказания целевых свойств частично наблюдаемого объекта. Разработаны метод выявления имплицативных закономерностей в булевом пространстве признаков и построения соответствующей базы знаний, а также оригинальные методы дедуктивного вывода на этапе распознавания. Предложенные методы обобщены на случай многозначных признаков с использованием введенного аппарата конечных предикатов.

Теоретические основы логики распознавания нашли отражение в созданной в лаборатории экспертной системе «ЭКСИЛОР» (ЭКспертной СИстеме ЛОгического Расознавания в пространстве дискретных признаков). В ней распознавание сведено к решению логических уравнений над конечными предикатами – двухзначными (0,1) функциями многозначных (конечно-значных) аргументов. Знания о предметной области поданы в виде имплицативных закономерностей и трактуются как информация о невозможных сочетаниях значений признаков. Закономерности выражены в форме конъюнктов-запретов или дизъюнктов. Выявленные зако-

номерности, имеющие место для объектов распознавания, вводились в систему «ЭКСИЛОР» экспертом или получались путем индуктивного вывода на основании выборки данных, после чего рассматривались в качестве аксиом при дедуктивном выводе (распознавании). Система распознавания снабжена средствами объяснения вывода. Главными информационными блоками системы, реализованной на ПЭВМ, являлись база знаний, задающая закономерности, и база данных, в которой содержатся описания объектов в пространстве признаков. Подход, заложенный в основу создания ЭКСИЛОР, был использован при разработке распознающих экспертных систем в конкретных проблемных областях. В данном направлении А.Д. Закревский вел работу в сотрудничестве с Ю.Н. Печерским – ученым Академии наук Молдавской ССР.

**Параллельные алгоритмы логического управления.** Наряду с усложнением элементной базы – появлением больших и сверхбольших интегральных схем – возросла также сложность тех технических объектов, для которых потребовалась разработка систем логического управления: станков, поточных линий, робототехнических комплексов. Автоматизация проектирования дискретных устройств и систем связана с соответствующими языковыми средствами, используемыми на различных этапах проектирования для описания основных объектов. В новых обстоятельствах потребовались соответствующие языковые средства для описания процессов логического управления, характеризующихся параллельностью и асинхронностью. Ответом на запросы практики стала монография «Параллельные алгоритмы логического управления» [24] (1999), где предложена модель алгоритма дискретного управления параллельными процессами – А-сеть. На ее основе были разработаны языки АЛУ и ПРАЛУ, позволяющие иерархически описывать широкий класс параллельных алгоритмов логического управления и объединяющие в себе сильные стороны языков, применяемых в конструкторской практике, и сетей Петри. Разработана алгоритмическая база для решения задач конструирования устройств управления, основанная на оригинальных моделях и декомпозиции проблемы проектирования на ряд формализованных задач, для которых предложены конкурирующие методы решения.

Язык ПРАЛУ, представленный в [24], опирается на мощный формализм сетей Петри. Особенности языка ПРАЛУ являются логическая стройность, простота, компактность получаемых описаний, использование двоичных (булевых) переменных для задания входов и выходов устройства управления, алгоритм функционирования которого задан на языке ПРАЛУ.

Определено понятие корректности параллельного алгоритма управления на языке ПРАЛУ; показано, что ее проверка в значительной степени сводится к проверке живости и безопасности введенной формальной модели –  $\alpha$ -сети; разработан ряд эффективных методов проверки этих свойств. Впервые предложены быстрые алгоритмы диагностики и проверки корректности алгоритмов управления ряда важных типов, а также методы моделирования сетями Петри алгоритмов логического управления, анализа ординарных и операционных сетей Петри.

Разработаны методы равносильных преобразований, композиции и декомпозиции алгоритма на языке ПРАЛУ, позволяющие упростить их или получить описание заданного типа, полезного при проектировании специализированных систем управления, в частности мультипроцессорных систем; предложены методы синтеза логических схем, реализующих ПРАЛУ-описания, на ПЛМ с памятью в виде регистра RS-триггеров. Промежуточными моделями при схемной реализации ПРАЛУ-описаний являлись автоматные модели параллельного алгоритма управления – параллельный и секвенциальный автоматы.

Формализованы отношения эквивалентности и реализации конечных автоматов, выделены реализации доопределением, кодированием и расширением. Разработан комплекс точных и приближенных, матричных и графовых методов минимизации и декомпозиции полных и частичных автоматов, кодирования внутренних состояний синхронного и асинхронного автоматов, получения булева автомата. Предложены секвенциальная модель алгоритма управления и формы задания секвенциальных автоматов, полезные при решении задач анализа и синтеза, отношения эквивалентности и реализации между ними. Введено понятие инерционного и частично-секвенциальных автоматов, разработаны методы их анализа и реализации на матричных СБИС.

Основной оптимизационной задачей при схемной реализации параллельного автомата и переходе к секвенциальному автомату стала задача кодирования состояний параллельного ав-

томата, а критерием оптимизации явилось число кодирующих переменных и простота реализации получаемого секвенциального автомата. Введено понятие интервального вытесняющего кода частичных состояний, сформулированы требования, обеспечивающие совместимость кодов параллельных состояний, а также разработан комплекс матричных, итерационных, декомпозиционных и блочных методов кодирования состояний параллельных синхронных автоматов.

Язык ПРАЛУ является входным языком отечественных систем автоматизированного проектирования (САПР) цифровых устройств, разработанных в лаборатории логического проектирования. Важно отметить особенности схемной реализации параллельных ПРАЛУ-алгоритмов. Во-первых, возможна как синхронная, так и асинхронная реализация; во-вторых, при схемной реализации ПРАЛУ-описаний параллельного алгоритма осуществляется глобальное кодирование состояний соответствующего параллельного автомата. Именно это и отличает данный подход от развиваемых в зарубежных САПР подходов, где синтез осуществляется заменой локальных алгоритмических конструкций языков VHDL, Verilog соответствующими логическими выражениями либо установкой в получаемую схему элементов памяти. Кроме того, для ПРАЛУ можно проверять семантические свойства (безызбыточность, восстанавливаемость, непротиворечивость, устойчивость, самосогласованность), в то время как при моделировании VHDL-описаний проверяется лишь синтаксическая корректность. Следует заметить, что это возможно из-за ограниченности множества операций: допускаются лишь операции ожидания и установки значений (0,1) булевых переменных.

**Полиномиальная реализация булевых функций.** Монография «Полиномиальная реализация частичных булевых функций и систем» [25] (2001) заполнила теоретический пробел в области оптимизации полиномиальных представлений булевых функций – полиномов Жегалкина и Рида – Маллера для частичных функций и систем. Предложенные алгоритмы поиска минимальной полиномиальной реализации системы частичных булевых функций базировались на теории линейных векторных пространств. Методы обобщены также на случай  $k$ -значной логики.

Задачи экономного представления булевых функций полиномами Жегалкина, Рида – Маллера фиксированной полярности или общего типа (при оптимальном синтезе AND/EXOR-схем) сведены к составлению и решению матричных уравнений с использованием методов теории линейных векторных пространств. Разработан комплекс эффективных методов на основе векторных и матричных представлений, включающий методы реализации частичных булевых функций полиномами Жегалкина, в частности метод реализации булевых функций на основе лестничного алгоритма минимизации полинома и быстрый приближенный метод синтеза реализующего полинома Жегалкина. Эти методы обобщены для систем частичных булевых функций: предложен метод минимизации таких систем в классе полиномов Жегалкина и метод реализации систем многозначных частичных функций поляризованными полиномами Рида – Маллера. На основе предложенных методов оптимизации полиномиальных представлений булевых функций разработаны подходы к диагностированию константных неисправностей в EXOR-схемах.

**Логико-комбинаторный подход к решению задач проектирования.** А.Д. Закревским был предложен общий методологический подход к решению задач алгоритмического, логического и топологического проектирования СБИС [26–28], в рамках которого проблема проектирования рассматривалась как комплексная. Она требовала сначала теоретического решения на основе выяснения логико-комбинаторной природы решаемых задач в их точной постановке и только после этого – проведения разработки эффективных точных и приближенных алгоритмов их решения, программной реализации, экспериментального исследования программ и выбора лучших для включения в создаваемые системы проектирования. При этом критерии оптимизации от этапа к этапу менялись и отражали прямо либо косвенно основные критерии оптимизации логических схем: сложность (площадь кристалла), быстродействие, тестопригодность и энергопотребление.

Был определен набор комбинаторных задач дискретной математики, к решению которых сводилось подавляющее большинство задач проектирования и которые были представимы в терминах логических векторов и матриц. Предложена техника вычислений в булевом пространстве, базирующаяся на сокращенном обходе дерева поиска, декомпозиции и редуцирова-



нии возникающих ситуаций с максимальным усечением неперспективных ветвей дерева поиска. Разработан комбинаторный базис логического проектирования – комплекс эффективных методов и программ решения комбинаторных задач над логическими матрицами, имеющих множество полезных практических интерпретаций. Это были задачи о кратчайшем покрытии, минимальном дизъюнктивном коде и базисе, минимальном диагностическом тесте, минимальной и плотной упаковке, а также задачи над графами: поиск клик и кратчайших путей в графе, проверка графа на связность, раскраска вершин графа, кратчайшее покрытие графа полными двудольными подграфами и др.

Сотрудниками лаборатории логического проектирования также уделялось большое внимание комбинаторному обеспечению проектирования: развивались методы решения логических уравнений, комбинаторных задач теории графов, задач над булевыми и троичными матрицами, методы оптимизации различных форм представлений булевых функций и систем булевых функций.

**Основы логического проектирования дискретных устройств.** Монография «Логические основы проектирования дискретных устройств» была издана в трех книгах в ОИПИ НАН Беларуси и переиздана в России одной книгой [29]. В первой книге [30] представлены базовые понятия по теории множеств и теории графов, логике высказываний и предикатов, булевой алгебре, а также комбинаторные задачи и методы комбинаторного поиска, булевы функции и формы их представления. Вторая книга [31] посвящена методам оптимизации представлений полностью и частично определенных булевых функций и систем таких функций, ДНФ и полиномиальных представлений Жегалкина и Рида – Маллера, в ней приведены методы декомпозиции (функционального разложения) полностью и не полностью определенных булевых функций. В третьей книге [32] рассмотрены задачи проектирования систем логического управления: синтеза комбинационных схем и схем с памятью на различной элементной базе (библиотечных логических элементах, транзисторных матрицах и ПЛИМ). В качестве исходных описаний (заданий на проектирование) могли выступать конечные автоматы, граф-схемы алгоритмов, секвенциальные автоматы, параллельные автоматы, а также параллельные алгоритмы управления на языке ПРАЛУ. Трилогия была переведена на английский язык и издана в Эстонии при содействии проректора Таллиннского технического университета А. Кееваллика. Все монографии подвели своеобразный итог полученным в лаборатории результатам по схемной реализации устройств логического управления и часто до сих пор рекомендуются в качестве учебного пособия для теоретической подготовки студентов вузов в области логического проектирования.

Важной чертой научного творчества А.Д. Закревского явилось то, что он достаточно часто возвращался к уже решенным задачам и находил новые, более эффективные методы их решения. Прежде всего это касается классических задач минимизации и функционального разложения булевых функций. Последняя задача часто называется также задачей простой декомпозиции булевой функции, когда требуется найти двухблочное разбиение (либо покрытие) множества аргументов булевой функции на два подмножества, по которым проводится разложение. Первая статья по данной проблеме была написана в 1964 г., а затем в 2007 г. Аркадием Дмитриевичем были предложены новые алгоритмы ее решения.

**Вычисления в многомерном булевом пространстве.** Прогресс в области интегральных технологий привел к удешевлению элементов памяти, что позволило использовать в вычислительных системах память большого объема. Основными проблемами в микроэлектронике стали быстродействие схем и их энергопотребление. Отражением возможностей использования памяти большого объема при решении оптимизационных логико-комбинаторных задач явилась монография «Вычисления в многомерном булевом пространстве» [33] (2011). Большой заслугой А.Д. Закревского стало кардинальное изменение развиваемого им на протяжении всей своей научной деятельности подхода к решению логико-комбинаторных задач, который существенным образом ориентировался на ограниченный объем памяти компьютеров. Обычно память была небольшого объема, это приходилось учитывать при создании эффективных алгоритмов и программ. Однако многие комбинаторные задачи упростились, когда появилась «большая» память, а вместе с этим и возможность оперирования векторами большой размерности, в качестве которых выступали столбцы значений функций на наборах значений аргументов из таблиц

истинности булевых функций и их систем. Аркадий Дмитриевич ввел операции над булевыми функциями в таком представлении и переформулировал на этот язык многие оптимизационные задачи: минимизацию булевых функций, нахождение простого функционального разложения и др. Это позволило увеличить скорость решения задач практической размерности, когда число аргументов булевых функций достигало трех десятков. Были проведены соответствующие вычислительные эксперименты.

### **Научная и организационная деятельность А.Д. Закревского**

Особенностью научной деятельности А.Д. Закревского явилось то, что, получив результаты в каком-то направлении, он публиковал сначала научные статьи и выступал с докладами на конференциях, а затем готовил монографии. В перечисленных монографиях представлены далеко не все результаты, которые были опубликованы в научных статьях. Хотелось бы привести некоторые из них, которые по своей значимости не уступают монографиям. Например, в статьях [34, 35] сформулированы принципы создания диалоговых систем проектирования, в [26, 27] поставлены важные теоретические задачи, возникающие в области логического проектирования и искусственного интеллекта. В последние годы своей жизни А.Д. Закревский занимался проблемами сокращения энергопотребления схем с памятью, которые реализуют конечные автоматы [36, 37].

С первых дней работы в Институте технической кибернетики АН БССР А.Д. Закревский много внимания уделял организации научных исследований. Каждый научный сотрудник его лаборатории проводил исследования в своей области системного программирования или логического проектирования, поэтому большое значение придавалось обсуждению получаемых результатов и расширению научного кругозора. В январе 1972 г. Аркадий Дмитриевич организовал городской научный семинар «Логическое проектирование», которым бессменно руководил до 2014 г. Им было принято, что любая научная работа, которую планировалось заслушать на этом семинаре, проходила сначала этап рецензирования и, несмотря на свою занятость, Аркадий Дмитриевич, как правило, знакомился с каждой из них. Рецензирование рукописи, выступление автора и обсуждение материала на этом семинаре часто было более серьезным процессом, чем рассмотрение соответствующей статьи в редакции журнала, куда ее планировалось направить. При оценке доклада решающее мнение было за руководителем семинара, и оно никогда не подвергалось сомнению. Внимательно читая, а по сути, рецензируя подготовленные научные работы, А.Д. Закревский был прекрасно осведомлен о том, чем занимается каждый его сотрудник или аспирант, насколько он продвинулся в решении поставленной задачи.

Начиная с 1975 г. лаборатория издавала ежегодный сборник научных трудов «Алгоритмы решения логико-комбинаторных задач». Под таким названием было выпущено шесть изданий. Сначала они нумеровались, затем в 1980 г. сборник был выпущен без номера, а после стали выходить выпуски того же сборника статей, но под разными названиями. С появлением персональных компьютеров с 1990 г. стал выходить ежегодник «Логическое проектирование». Всего под редакцией А.Д. Закревского было выпущено семь ежегодных сборников под одним названием. Сборники были гордостью Аркадия Дмитриевича, в них аккумулировались алгоритмы и даже программы, а включение статьи в сборник было возможным только после получения рекомендации семинара. В 2004 г. в ОИПИ НАН Беларуси начал издаваться периодический журнал «Информатика», где имеется раздел «Логическое проектирование».

После распада Советского Союза (1991) перестали проводиться практически все периодические научные конференции. В 1995 г. силами сотрудников лаборатории была организована и проведена Международная конференция «Автоматизация проектирования дискретных устройств» (International Conference on Computer-Aided Design of Discrete Devices – CAD DD). Всего за период 1995 – 2010 гг. было проведено семь конференций с таким названием. Аркадий Дмитриевич был бессменным председателем программных комитетов конференции, оценивал каждый из докладов лично, рекомендовал рецензентов, участвовал в распределении докладов по секциям и составлении планов работы секций.

В биобиблиографии [38], изданной к 80-летию А.Д. Закревского, содержится хронологический перечень научных трудов за период с 1956 по 2007 г. Всего в ней перечислено 565 на-

именований, в том числе 54 сборника научных трудов и других изданий, в которых он был редактором либо соредактором. В книге [39] имеется глава, посвященная научной, научно-организационной, педагогической и общественной деятельности А.Д. Закревского, где указывается, что он является автором более 540 научных работ, научным руководителем 34 кандидатов и 8 докторов наук. Около 30 заметок и статей было издано о его жизни и научной деятельности. Аркадий Дмитриевич всегда был твердым и бескомпромиссным искателем научной истины и настоящим лидером созданной им научной школы.

Помимо научных работ Аркадий Дмитриевич подготовил две книги воспоминаний: «Поет морзянка» о своей работе радистом в экспедициях по изысканию проведения железнодорожных путей и «В Томском университете» о своей студенческой жизни и научной работе в Томском государственном университете.

Фундаментальность научных идей А.Д. Закревского, создание им научной школы, развитие его идей в области логического проектирования учениками позволили коллективу лаборатории логического проектирования получить впечатляющие научные результаты мирового уровня. Достаточно сказать, что за 45 лет существования лаборатории логического проектирования заведующим и сотрудниками лаборатории было опубликовано 53 книги (44 монографии и 9 учебных пособий для студентов вузов) и более 1000 научных статей.

### Список литературы

1. Закревский, А.Д. Формализация синтеза электронной цифровой вычислительной машины / А.Д. Закревский // Труды СФТИ. – Вып. 40 : Вычислительная техника, автоматика, теория информации. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1961. – С. 64–72.
2. Закревский, А.Д. Метод синтеза диодных логических схем / А.Д. Закревский // Там же. – С. 73–88.
3. Закревский, А.Д. Визуально-матричный метод минимизации булевых функций / А.Д. Закревский // Автоматика и телемеханика. – 1960. – № 3. – С. 369–373.
4. Закревский, А.Д. Вычисления в булевых пространствах / А.Д. Закревский // Логическая структура научного знания. – М. : Наука, 1965. – С. 292–310.
5. Закревский, А.Д. Алгоритмы минимизации слабо определенных булевых функций / А.Д. Закревский // Кибернетика. – 1965. – № 2. – С. 53–60.
6. Закревский, А.Д. К синтезу последовательностных автоматов / А.Д. Закревский // Труды СФТИ. – Вып. 40 : Вычислительная техника, автоматика, теория информации. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1961. – С. 89–94.
7. Закревский, А.Д. Операторный метод синтеза алгоритмических систем / А.Д. Закревский // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1959. – № 2. – С. 306–315.
8. Закревский, А.Д. О сокращении переборных при решении некоторых задач синтеза дискретных автоматов / А.Д. Закревский // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1964. – № 1. – С. 166–174.
9. Закревский, А.Д. Покрытия множеств / А.Д. Закревский // Труды СФТИ. – Вып. 48 : Автоматизация синтеза дискретных автоматов. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1966. – С. 69–72.
10. Закревский, А.Д. Оптимизация покрытий множеств / А.Д. Закревский // Логический язык для представления алгоритмов синтеза релейных устройств. – М. : Наука, 1966. – С. 136–147.
11. Закревский, А.Д. Функциональная устойчивость релейных схем / А.Д. Закревский // Труды СФТИ. – Вып. 40 : Вычислительная техника, автоматика, теория информации. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1961. – С. 112–126.
12. Закревский, А.Д. Метод автоматической шифрации сообщений / А.Д. Закревский // Прикладная дискретная математика. – 2009. – № 2(4). – С. 127–137.
13. Закревский, А.Д. Машина для решения логических задач типа синтеза релейных схем / А.Д. Закревский // Синтез релейных структур : тр. Междунар. симп. по теории релейных устройств и конечных автоматов (ИФАК). – М. : Наука, 1965. – С. 346–356.
14. Закревский, А.Д. Алгоритмический язык ЛЯПАС и автоматизация синтеза дискретных автоматов / А.Д. Закревский; МВ и ССО РСФСР, СФТИ им. В.А. Кузнецова при Томском гос. ун-те ; [науч. ред. В.П. Тарасенко]. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1966. – 266 с.

15. Логический язык для представления алгоритмов синтеза релейных устройств / Под ред. М.А. Гаврилова. – М. : Наука, 1966. – 342 с.
16. LYaPAS, A Programming Language for Logic and Coding Algorithms / Ed. by M. Gavrilov and A. Zakrevskij. – N. Y., London : ACM Monograph Series, 1969.
17. Закревский, А.Д. Алгоритмы синтеза дискретных автоматов / А.Д. Закревский. – М. : Наука, 1971. – 512 с.
18. Синтез асинхронных автоматов на ЭВМ / [авт.-сост.: А.Д. Закревский, Л.И. Балаклея, Н.А. Елисеева и др.] ; под общ. ред. А.Д. Закревского. – Минск : Наука и техника, 1975. – 184 с.
19. Закревский, А.Д. Логические уравнения / А.Д. Закревский. – Минск : Наука и техника, 1975. – 96 с. ; изд. 2-е. – М. : УРСС, 2003. – 96 с.
20. Закревский А.Д. Решение больших систем логических уравнений / А.Д. Закревский. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2009. – 96 с. ; Solving Large Systems Logical Equations / A.D. Zakrevskij. – Tallinn : TUT Press, 2013. – 114 p.
21. Закревский, А.Д. Система программирования ЛЯПАС-М / А.Д. Закревский, Н.Р. Торопов ; АН БССР, Ин-т техн. кибернетики. – Минск : Наука и техника, 1978. – 240 с.
22. Закревский, А.Д. Логический синтез каскадных схем / А.Д. Закревский. – М. : Наука, 1981. – 416 с.
23. Закревский, А.Д. Логика распознавания / А.Д. Закревский ; АН БССР, Ин-т техн. кибернетики. – Минск : Наука и техника, 1988. – 118 с. ; изд. 2-е, доп. – М. : УРСС, 2003. – 140 с.
24. Закревский, А.Д. Параллельные алгоритмы логического управления / А.Д. Закревский. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 202 с. ; изд. 2-е. – М. : УРСС, 2003. – 200 с.
25. Закревский, А.Д. Полиномиальная реализация частичных булевых функций и систем / А.Д. Закревский, Н.Р. Торопов. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001. – 200 с ; изд. 2-е. – М. : УРСС, 2003. – 200 с.
26. Закревский, А.Д. Комбинаторика логического проектирования / А.Д. Закревский // Автоматика и вычислительная техника. – 1990. – № 2. – С. 68–79.
27. Закревский, А.Д. Комбинаторные задачи над логическими матрицами в логическом проектировании и искусственном интеллекте / А.Д. Закревский // Зарубежная радиоэлектроника: успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 2. – С. 59–67.
28. Boolesche Gleichungen. Theorie, Anwendung, Algorithmen / ed. mit D. Bochmann, A. Zakrevskij und Ch. Posthoff. – Berlin : VEB Verlag Technik, 1984.
29. Закревский, А.Д. Логические основы проектирования дискретных устройств / А.Д. Закревский, Ю.В. Поттосин, Л.Д. Черемисинова. – М. : Физматлит, 2007. – 590 с.
30. Закревский, А.Д. Основы логического проектирования: в 3 кн. / А.Д. Закревский, Ю.В. Поттосин, Л.Д. Черемисинова. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2004. – Кн. 1: Комбинаторные алгоритмы дискретной математики. – 225 с. ; Combinatorial algorithms of discrete mathematics. – Tallinn : TUT Press, 2008. – 192 p.
31. Закревский, А.Д. Основы логического проектирования : в 3 кн. / А.Д. Закревский, Ю.В. Поттосин, Л.Д. Черемисинова. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2004. – Кн. 2 : Оптимизация в булевом пространстве. – 240 с. ; Optimization in Boolean space. – Tallinn : TUT Press, 2009. – 241 p.
32. Закревский, А.Д. Основы логического проектирования : в 3 кн. / А.Д. Закревский, Ю.В. Поттосин, Л.Д. Черемисинова. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2006. – Кн. 3 : Проектирование устройств логического управления. – 254 с. ; Design of Logical Control Devices. – Tallinn : TUT Press, 2009. – 304 p.
33. Закревский А.Д. Вычисления в многомерном булевом пространстве / А.Д. Закревский. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2011. – 106 с. ; Combinatorial Calculations in Many-Dimensional Boolean Space / A.D. Zakrevskij ; ed. A. Keevalik. – Tallinn : TUT Press, 2012. – 121 p.
34. Закревский, А.Д. Автоматизация логического синтеза дискретных устройств / А.Д. Закревский // Кибернетика. – 1975. – № 4. – С. 100–108.
35. Закревский, А.Д. Принципы построения диалоговых систем проектирования и их реализация в системе логического синтеза / А.Д. Закревский // Оптимизация систем сбора, передачи

и обработки информации в человекомашиных системах. – Минск : Ин-т техн. кибернетики АН Беларуси, 1980. – С. 3–6.

36. Закревский, А.Д. Энергосберегающее кодирование состояний конечного автомата. Метод квадратов / А.Д. Закревский // Информатика. – 2005. – № 4. – С. 105–113.

37. Закревский, А.Д. Нахождение режима максимального энергопотребления логической схемы / А.Д. Закревский // Прикладная дискретная математика. – 2012. – № 2(16). – С. 100–104.

38. Биобиблиография ученых Беларуси. Член-корреспондент Аркадий Дмитриевич Закревский (к 80-летию со дня рождения) / НАН Беларуси, Объед. ин-т проблем информатики, ЦНБ им. Я. Коласа. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – 91 с.

39. Кибернетика и информатика в Национальной академии наук Беларуси: очерки развития / Объед. ин-т проблем информатики НАН Беларуси ; науч. ред.: С.В. Абламейко, А.В. Тужиков, О.И. Семенов. – Минск : Тэхналогія, 2015. – 348 с.

Поступила 28.11.2016

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: bibilo@newman.bas-net.by*

**P.N. Bibilo, Yu.V. Pottosin, L.D. Cheremisinova**

**ON SCIENCE HERITAGE OF CORRESPONDING  
MEMBER A.D. ZAKREVSKIJ**

Arkadij Dmitrievich Zakrevskij was at the beginnings of cybernetics origin in the Soviet Union. He is the founder of one of the known schools of logical design in the Soviet Union and all the world. This paper is devoted to the science heritage of A.D. Zakrevskij.