

Исторические обзоры

Historical Reviews

DOI: 10.31857/S020596060020624-8

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГЕБРЫ ЛОГИКИ В МОДЕЛЯХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ

МИРОНОВ Валентин Васильевич – Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина; Россия, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1;
E-mail: mironov1vv@mail.ru

ФЕДОСОВА Елена Борисовна – Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина; Россия, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1;
E-mail: lena.fedosova2019@mail.ru

© В. В. Миронов, Е. Б. Федосова

Статья посвящена историографии применения классической алгебры логики в моделях технических систем. Данная проблема анализируется как в историческом, так и в современном контекстах. Особый акцент сделан на освещении одного из разделов дискретной математики – теории надежности, синтеза и сложности управляющих систем, в частности задаче математического моделирования синтеза надежных функций и функциональных схем из ненадежных элементов. Техническая реализация в аппаратуре логических функций надежных схем алгебры логики при использовании ненадежной элементной базы является одним из актуальных направлений прикладной алгебры логики.

Ключевые слова: история техники, булева алгебра, алгебра логики, применение логики, технические системы, математическое моделирование, синтез надежных функций и схем.

Статья поступила в редакцию 4 октября 2021 г.

THE APPLICATION OF LOGIC ALGEBRA IN THE MODELS OF TECHNICAL SYSTEMS: HISTORY AND CONTEMPORANEITY

MIRONOV Valentin Vasilievich – Ryazan State Radio Engineering University; Ul. Gagarina, 59/1, Ryazan, 390005, Russia; E-mail: mironov1vv@mail.ru

FEDOSOVA Elena Borisovna – Ryazan State Radio Engineering University; Ul. Gagarina, 59/1, Ryazan, 390005, Russia; E-mail: lena.fedosova2019@mail.ru

© V. V. Mironov, E. B. Fedosova

Abstract: The article is devoted to the historiography of the application of classical logic algebra in the models of technical systems. This problem is analyzed in both the historical and contemporary contexts. Particular attention is given to a section of discrete mathematics, the theory of reliability, synthesis and complexity of control systems, in particular, mathematical modeling of the synthesis of reliable functions and functional circuits from unreliable gates. The technical implementation of reliable logic algebra circuits in the logic function devices, using an unreliable element base, is one of the topical areas in applied logic algebra.

Keywords: history of technology, Boolean algebra, algebra of logic, application of logic, technical systems, mathematical modeling, synthesis of reliable functions and circuits.

For citation: Mironov, V. V., and Fedosova, E. B. (2022) *Primenenie algebrы logiki v modeliakh tekhnicheskikh sistem: istoriia i sovremennost'* [The Application of Logic Algebra in the Models of Technical Systems: History and Contemporaneity], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 43, no. 2, pp. 328–349, DOI: 10.31857/S020596060020624-8.

Введение

История зарождения и развития математической логики, ее современное состояние и, главным образом, практическое применение аппарата логики к описанию современных технических систем, в особенности систем управления и искусственного интеллекта, — малоизученные темы, которым посвящено весьма небольшое количество работ, как российских, так и зарубежных. Между тем зародившаяся в Древней Греции в основном трудами Аристотеля (384–322 гг. до н. э.), логика к настоящему времени проделала длинный путь в своем развитии, начиная со способов построения правильных рассуждений и заканчивая использованием ее в современных масштабных логических нейронных сетях. С течением времени логика завоевала прочные позиции не только в теоретической алгебре, но и при моделировании технических систем.

В данной работе собраны и проанализированы с историографических позиций публикации, посвященные (полностью или частично) алгебре логики и практическому применению алгебры в разных сферах научно-технической деятельности человека. Отметим границу понятий «логика», «булева логика», «алгебра логики», «булева алгебра»: алгебры трактуются как алгебраические системы (несущее множество и сигнатура из символов алгебраических операций и предикатов), а логики, в том числе математическая логика, трактуются как способы рассуждений или формализации рассуждений, позволяющие из одних истинных высказываний строить (выводить) другие высказывания, столь же истинные.

Периодизация истории алгебры логики осуществлялась исходя из двух взаимосвязанных критериев: внутренних мотивов развития науки

математической логики и времени применения научных результатов в конкретных технических системах и обратной связи по мере накопления результатов (когда накопленные практические результаты диктуют новые мотивы развития теории).

Алгебры логики как инструмент моделирования технических систем: исторический аспект

Как известно, алгебра логики — это «раздел математической логики, изучающий высказывания со стороны их логических значений (истинности или ложности) и логические операции над ними»¹. Применение алгебры логики для моделирования технических систем имеет свою предысторию. В конце XVII в. немецкий математик Г. В. Лейбниц предложил идею новой (неаристотелевой) логики как искусства исчисления². В основе такой логики должны были лежать некие символы и правила работы с ними. После этого собственно и зарождается математическая логика как мощное, динамично развивающееся направление математики и ее приложений³. Ее возникновение имело для математики такое же фундаментальное значение, как и введение Р. Декартом переменных в язык математики. Можно сказать, что Лейбниц сформулировал логическую программу, над которой работали несколько поколений ученых⁴.

Основателем алгебры логики считается английский математик Дж. Буль, от фамилии которого в дальнейшем и образовались названия «булева логика», «булева алгебра». Он первым строго реализовал идею Лейбница и разработал аппарат математического описания логических рассуждений в работах «Математический анализ логики»⁵ и «Исследование законов мышления»⁶. Здесь в контексте создания и разработки булевой логики следует упомянуть и других английских ученых — А. де Моргана и У. С. Дживонса, чьи работы придали алгебре логики практически современный вид⁷. Тем не менее возможность реального приложения аппарата алгебры логики к решению технических задач была высказана гораздо позднее.

¹ Кудрявцев В. Б. Алгебра логики // Большая советская энциклопедия. В 30 т. 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1969. Т. 1. С. 397–398.

² Лейбниц Г. В. Об универсальной науке, или философском исчислении // Лейбниц Г. В. Сочинения в четырех томах. М.: Мысль, 1984. Т. 3. С. 494–500.

³ См.: Математика XIX века. Математическая логика. Алгебра. Теория чисел. Теория вероятностей / Ред. А. Н. Колмогоров, А. П. Юшкевич. М.: Наука, 1978. Т. 1.

⁴ Кузичева З. А. Логическая программа Лейбница и ее роль в истории логики и кибернетики // Вопросы кибернетики. Кибернетика и логическая формализация. Аспекты истории и методологии. М.: Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика», 1982. Вып. 78. С. 3–36.

⁵ Boole, G. The Mathematical Analysis of Logic. Cambridge: MacMillan, Barclay & MacMillan; London: George Bell, 1847.

⁶ Boole, G. An Investigation of the Laws of Thought. Cambridge: MacMillan and Co., 1854.

⁷ См.: Шилов В. В. История логических машин. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014; Шилов В. В. Логические машины и их создатели. Краткая, но практически полная история // Информационные технологии. 2008. № 8 (приложение). С. 1–40.

Математическая логика как наука триумфально прошла и продолжает проходить путь от теории к практике. Еще в «добоулевский, нестрогий» период, начиная примерно с XIII в., предпринимались попытки создать так называемые логические машины – устройства механического выполнения логических операций; здесь достаточно вспомнить логическую машину Р. Луллия. Создание же булевой логики привело к появлению первых настоящих логических машин (вторая половина XIX – начало XX в.). К их числу относятся машина У. С. Джевонса и ее дублиеры, созданные русскими учеными П. Д. Хрущевым и А. Н. Шукаревым, машина А. Маркванда и др.⁸ Однако эти первые логические машины предназначались в основном для решения силлогизмов, использовались для демонстраций на лекциях, не принесли весомой практической пользы и не получили распространения.

В последней четверти XIX в. появляются достаточно сложные технические системы, для описания работы которых могла быть использована алгебра логики. По целому ряду причин ими оказались не электрические схемы, при разработке которых инженеры руководствовались простым здравым смыслом, а механические системы централизованного управления железнодорожными станциями с несколькими путями и большим количеством стрелок, переводивших поезда с одного пути на другой. Для описания и контроля работы такого централизованного поста управления стрелками бельгийские и французские инженеры создали две системы записи, в основу работы которых положили двоичный принцип (нормальное или переведенное положение рычага управления стрелкой). Но даже система А. Фламаша, операторы которой внешне были очень похожи на выражения алгебры логики, не обладала гибкостью последней⁹. Впрочем, уже в 1886 г. американский логик Ч. С. Пирс в письме своему бывшему студенту Маркванду, сконструировавшему логическую машину, указал на возможность реализации функций логического сложения и умножения при помощи простых электрических схем с тремя ключами¹⁰.

Подводя итоги развития алгебры логики в XIX в., французский математик Л. Кутюра в своей книге «Алгебра логики» подчеркивал, «что эта алгебра допускает в самой логике две различные, почти параллельные интерпретации, в зависимости от того, выражают ли буквы понятия или предложения»¹¹. То есть речь идет об исчислении классов или исчислении предложений (высказываний). Именно исчисление предложений П. Эрэнфест рекомендовал использовать для описания работы релейно-контактных схем. В 1910 г. он опубликовал развернутую рецензию на упомянутую книгу Кутюра. В этой рецензии впервые публично была отмечена и весьма ясно сформулирована

⁸ Кузичева З. А. Влияние теории релейно-контактных схем на развитие математической логики // Вестник Московского университета. Серия 7: Философия. 2009. № 1. С. 53–63.

⁹ Дружинин Ю. О. История первых попыток применения алгебры логики для решения технических задач // ВИЕТ. 2019. Т. 40. № 1. С. 9–20.

¹⁰ Letter, Peirce to A. Marquand, 1886 December 30 // Writings of Charles S. Peirce: A Chronological Edition / Ch. J. W. Kloesel (ed.). Bloomington; Indianapolis: Indiana University Press, 1993. Vol. 5: 1884–1886. P. 421–423.

¹¹ Кутюра Л. Алгебра логики. 2-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. С. 1–2.

идея возможности применения алгебры логики в вопросах электротехники¹². Однако реализация этой идеи относится только к 30-м гг. XX в.

Справедливости ради отметим вклад в означенную проблему российского ученого Н. М. Герсеванова¹³, который изучал вопросы и строительного дела, и прикладной математики. В 1923 г. он опубликовал работу «Применение математической логики к расчету сооружений»¹⁴, в которой использовал логический аппарат, базирующийся на упомянутой выше книге Кутюра. Впрочем, подходы Герсеванова, обстоятельно рассмотренные в работе Б. В. Бирюкова и И. П. Прядко¹⁵, не получили развития ни в его последующих работах, ни в работах его учеников. Кроме того, статья Герсеванова была издана всего в 300 экземплярах и, как пишут исследователи его творчества, «работа эта не была известна В. И. Шестакову; а когда она в 1948 г. была переиздана, для него она была уже не интересна, так как Виктор Иванович уже шел своим собственным путем»¹⁶.

Предыстория применения алгебры логики для моделирования технических систем завершается в 30-е гг. XX в. с публикацией работ К. Э. Шеннона (США), А. Накашимы (Япония) и В. И. Шестакова (СССР). Эти ученые почти одновременно и, как полагают эксперты, независимо друг от друга подошли к реальному использованию логики в задачах электротехники¹⁷. Шестаков¹⁸ в середине-конце 1930-х гг. был одним из первых (если не первым) отечественных исследователей, кто предложил идею применения аппарата булевой логики к описанию моделей релейно-контактных схем и, в более общем виде, к электротехническим задачам. Научный путь Шестакова, приведший его к признанию, обстоятельно изложен в работе В. И. Левина, посвященной 80-летию открытия логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств¹⁹.

¹² Бирюков Б. В., Шахов В. И. Первые приложения логики к технике: Эренфест, Герсеванов и Шестаков. От применения логики к расчету сооружений и релейным схемам к логической теории размерностей физических величин // Логические исследования. 2007. № 14. С. 73–104.

¹³ Николай Михайлович Герсеванов (1879–1950) – русский и советский грунтовед, ученый-механик, профессор, доктор технических наук, член-корреспондент АН СССР, основатель русской и советской школ механики грунтов.

¹⁴ Герсеванов Н. М. Применение математической логики к расчету сооружений // Герсеванов Н. М. Собрание сочинений: в 2 т. М.: Изд-во и типолитография № 1 Строймориздата, 1948. Т. 1. С. 123–204.

¹⁵ Бирюков Б. В., Прядко И. П. Применение логики в градостроительстве: трудный путь обретения // Вестник Московского университета. Серия 7: Философия. 2014. № 2. С. 76–87.

¹⁶ Бирюков, Шахов. Первые приложения логики к технике... С. 80.

¹⁷ Левин В. И., Бирюков Б. В. Еще раз об истории открытия логического моделирования технических устройств // Вестник Московского университета. Серия 7: Философия. 2009. № 1. С. 37–52.

¹⁸ Виктор Иванович Шестаков (1907–1987) – российский ученый, специалист по математической логике и теоретической электротехнике.

¹⁹ Левин В. И. Виктор Иванович Шестаков и 80-летие открытия логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 54–86.

Наравне с Шестаковым над применением алгебры логики в электротехнике независимо друг от друга работали американец Шеннон и японец Накашима. Магистерская диссертация «Символический анализ релейных и переключательных схем» Шеннона (1938) была посвящена методу нахождения простейшей схемы, реализующей сеть с требуемыми характеристиками²⁰. Решение проблемы было произведено также на базе использования алгебры логики. Работы Накашима, посвященные той же проблематике, были опубликованы в японских журналах даже раньше работ Шеннона и Шестакова, в 1935 г., однако в силу ряда обстоятельств не были доступны западным и советским ученым. Подробнее с этим можно ознакомиться в работе Левина²¹.

После этого возможность применения логики в моделировании технических систем, в частности электротехнических, стало настоящим прорывом в науке, поскольку средства алгебры логики позволили проводить формализованный анализ и синтез технических устройств, что значительно упростило и одновременно продвинуло работу с контактно-релейными схемами²².

Выявление связи булевой логики с моделированием электрических цепей стало фундаментальным событием, определившим направление развития дискретной вычислительной математики и техники. После установления того факта, что преобразование логической функции эквивалентно преобразованию структуры контактно-релейной или бесконтактной электрической схемы, алгебра логики получила совершенно иной статус в моделировании, став ключевым элементом в синтезе, анализе и преобразовании электрических схем. Подробный обзор применения алгебры логики в переключательных, релейных схемах, проблемах управления и схемах арифметических вычислений на середину XX в. составил Дж. Э. Уайтситт в своей фундаментальной работе, посвященной практическому применению булевой логики на практике²³. Релейно-переключающие схемы стали первым этапом применения логики в технических системах. С течением времени релейные схемы ввиду своих неоптимальных параметров надежности, габаритов, энергопотребления и т. д. были замещены транзисторными схемами. Однако теория контактно-релейных схем стала некой классической моделью, анализирующей свойства реальных объектов абстрагированно от физической природы этих объектов.

²⁰ Левин В. И. Клод Элвуд Шеннон и 80-летие открытия логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 1. С. 1–32.

²¹ Левин В. И. Акира Накашима и 80-летие открытия логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 296–322.

²² Контакттно-релейная схема представляет собой устройство из проводников, двухпозиционных контактов и источника тока, у которого контакт бывает в двух состояниях: разомкнутом (ему приписывают значение 0) и замкнутом (ему приписывают значение 1).

²³ Whitesitt, J. E. Boolean Algebra and Its Applications. London: Addison – Wesley Publishing Company, 1961.

К середине XX в. складывается второй этап применения логики в технике — теория автоматического управления (или регулирования)²⁴. В контексте проводимого исследования следует сделать оговорку: здесь речь идет о выделении теории автоматического регулирования в независимую научную дисциплину, поскольку отдельные задачи автоматического регулирования системами возникали и решались уже с середины XIX в. Знаковой работой, сформировавшей теорию автоматического регулирования как отдельную научную область, является монография Б. И. Доманского²⁵ «Автоматическое управление электрическими установками и системами»²⁶. После выпуска этой монографии появился целый ряд связанных с ней работ, однако с началом Второй мировой войны исследования в этой области приостановились (фактически на десять лет).

В послевоенное время теория автоматического регулирования развивалась в тесной связи с кибернетикой. В 1948 г. была опубликована работа Н. Винера «Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине»²⁷. Однако в СССР развитию теории автоматического регулирования в союзе с кибернетикой и одновременно развитию генетики препятствовало негативное отношение к этим «буржуазным» наукам со стороны руководства страны и ВАСХНИЛ²⁸. О причинах такого отношения до сих пор ведутся споры²⁹.

Одновременно с этим и в Европе кибернетика в силу своей еще неразвитости теряла научную привлекательность в глазах исследователей, дав тем не менее начало новым наукам о вычислительной технике, обработке информации и вообще информатизации, столь популярной в современном мире (так называемая область *computer science*).

Интересно отметить, что, очевидно, первым во введении самого термина «информатика» и на его основе термина «информатизация» был в 1956–1957 гг. К. Штайнбух³⁰ (по-немецки *Informatik*), затем в 1962 г. —

²⁴ Теория автоматического управления (ТАУ) — отрасль науки, изучающая процессы управления и проектирования автоматических систем, работающих по замкнутому циклу, иначе говоря, ТАУ изучает любые системы с обратной связью.

²⁵ Борис Иосифович Доманский (1887–1973) — видный ученый и практик, один из основателей науки об автоматике и телемеханике, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматике и телемеханики Ленинградского политехнического института.

²⁶ Доманский Б. И. Автоматическое управление электрическими установками и системами. М.; Л.: ГОНТИ, Главная редакция энергетической литературы, 1938.

²⁷ Wiener, N. Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine. Paris: Hermann & Cie; Cambridge, MA: The Technology Press; New York: John Wiley and Sons, 1948. Русское издание: Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. М.: Советское радио, 1958.

²⁸ Вспомним здесь трагическую судьбу Николая Ивановича Вавилова (1887–1943) — российского, советского генетика, химика, географа, растениевода, академика АН СССР и АН УССР, академика и первого президента ВАСХНИЛ.

²⁹ См.: Пихорович В. Д. Очерки истории кибернетики в СССР. 2-е изд. М.: ЛЕНАНД, 2019; Ревич Ю., Шилов В. Проект Китова — Глушкова // Знание-сила. 2019. № 5. С. 61–67.

³⁰ Карл Штейнбух (*Karl Steinbuch*, 1917–2005) — немецкий кибернетик, социолог, один из основателей и влиятельный исследователь информатики, разработчик первых моделей искусственных нейронных сетей.

француз Ф. Дрейфус³¹ (по-французски *informatique*, от слов *INFORmation* и *autoMATIQUE*), в 1963 г. — Ф. Е. Темников³² на русском языке, а вслед за ним в 1966 г. уже в широкий научный обиход термин ввели А. И. Михайлов³³, А. И. Черный³⁴, Р. С. Гиляревский³⁵ в значении *information science*.

Потом уже в 1978 г. А. П. Ершов³⁶ вслед за западным пониманием ввел термин «информатика» как *computer science*. Ныне в России под информационными технологиями понимают именно компьютерные технологии.

Теория автоматического регулирования (ТАУ) охватывает не только электрические цепи, но и гидравлические, кинематические и прочие. По мере развития ТАУ нашла применение в разных областях, в том числе в области наносхемотехники.

Помимо теории контактно-релейных цепей алгебра логики используется и в теории конечных автоматов (теории логических сетей). Основной ее задачей является синтез автоматов с конечной памятью — дискретных устройств, состоящих из логических элементов, представляющих собой конъюнкцию, дизъюнкцию и логическое отрицание. Одним из основных трудов в этой области считается сборник «Автоматы» 1956 г.³⁷, который был переведен в том числе и на русский язык³⁸. Этот сборник дает хорошее представление о начальном этапе теории автоматов и, в частности, о становлении

³¹ Филипп Дрейфус (*Philippe Dreyfus*, род. 1925) — французский физик, программист, инженер, один из основателей компьютерных технологий в Европе, профессор Гарвардского университета, директор французского Национального центра вычислительной техники, известен тем, что ввел понятие «язык программирования».

³² Федор Евгеньевич Темников (1906–1993) — ученый-системотехник, доктор технических наук, профессор Московского энергетического института, основатель российской школы информатики, предложил для использования в СССР научные понятия «системотехника», «телемеханика» и «информатика».

³³ Александр Иванович Михайлов (1905–1988) — один из главных создателей российской информатики и Государственной системы научно-технической информации СССР, директор ВИНТИ, последовательно в разные годы занимал должности зам. министра авиационной промышленности СССР, председателя Комитета по открытиям и изобретениям при Совете Министров СССР, зам. председателя Государственного комитета Совета Министров СССР по новой технике, министра высшего образования СССР, зам. министра среднего машиностроения СССР, зам. главного ученого секретаря Президиума АН СССР, профессор, доктор технических наук.

³⁴ Аркадий Иванович Черный (1929–2013) — один из главных создателей информатики в России, профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, работал в ВИНТИ РАН зам. директора по науке, главный редактор РЖ «Информатика».

³⁵ Руджеро Сергеевич Гиляревский (род. 1929) — советский и российский ученый, доктор филологических наук, профессор, специалист в области социальной информатики.

³⁶ Андрей Петрович Ершов (1931–1988) — доктор физико-математических наук, профессор, академик АН СССР, основоположник системного программирования, создатель сибирской школы информатики; внес большой вклад в подготовку программистов и реализацию национальной программы информатизации образования, его именем назван Институт систем информатики СО РАН.

³⁷ *Automata Studies* / С. Е. Shannon, J. McCarthy (eds.). Princeton: Princeton University Press, 1956 (*Annals of Mathematics Studies*. Vol. 34).

³⁸ *Автоматы* / Ред. К. Э. Шеннон, Дж. Маккарти. М.: Изд-во иностранной литературы, 1956.

математического моделирования функционирования человеческого мозга (так называемый логический анализ нейронных сетей).

Детальное состояние дел в прикладном использовании алгебры логики и более широко математической логики, а также в философском осмыслении этого процесса на рубеже 1950–1960-х гг. можно проследить по сборнику статей ведущих логиков и философов той поры (С. А. Яновская, А. С. Есенин-Вольпин, И. И. Ревзин, С. К. Шаумян, Ю. В. Петров, А. А. Зиновьев, Г. Н. Поваров, В. И. Шестаков, М. Л. Цетлин, Л. М. Шехтман, Т. Д. Майстрова, Г. Н. Поваров, Б. М. Кедров, Б. В. Бирюков³⁹).

Можно сказать, что булева алгебра, впервые примененная для описания статистики релейно-контактных схем, оказалась адекватной для схем, использующих двоичные логические элементы любой природы (от полупроводниковых до пневматических). Так как в основе современных ЭВМ используется двоичная арифметика (только в отечественной ЭВМ «Сетунь» применялась троичная логика и арифметика), то булева алгебра еще долго будет использоваться во всех приложениях. Любые другие виды математической логики в настоящее время могут быть реализованы программно на тех же универсальных ЭВМ.

Первые попытки построения нейронных сетей

Ключевую роль в практическом продвижении идеи создания «думающих» машин сыграла уже достаточно развитая к тому времени алгебра логики (см. основополагающую работу А. М. Тьюринга⁴⁰, а также другие его работы⁴¹). Осмысление границ применимости «думающих» машин предпринято, в частности, в работе О. П. Кузнецова⁴². Одной из пионерских работ в области формального представления работы нейронных (нервных) сетей стала статья У. С. Мак-Каллока и В. Питтса⁴³, опубликованная в 1943 г. В ней авторы установили, что поскольку нервная активность подчинена закону «все или ничего» (этот закон устанавливает соотношение между силой раздражителя и величиной ответной реакции, т. е. ткань не отвечает на раздражение при недостаточной величине этого раздражения и отвечает максимальным возбуждением при величине раздражения, равном или более некоторого порогового уровня), то события в нейронной сети может быть описано

³⁹ Применение логики в науке и технике / Отв. ред. П. В. Таванец. М.: Изд-во АН СССР, 1960.

⁴⁰ *Turing, A. M. Computing Machinery and Intelligence // Mind. 1950. Vol. 59. No. 236. P. 433–460.*

⁴¹ *Turing, A. M. Digital Computers Applied to Games // Faster Than Thought. A Symposium on Digital Computing Machines / B. V. Bowden (ed.). London: Sir Isaac Pitman & Sons Ltd., 1953. P. 286–310; Turing A. M. Intelligent Machinery // Machine Intelligence 5 / B. Meltzer, D. Michie (eds.). Edinburgh: Edinburgh University Press, 1969. P. 3–23.*

⁴² *Кузнецов О. П. Ограниченная рациональность и принятие решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. № 1. С. 3–15.*

⁴³ *McCulloch, W. S., Pitts, W. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. Vol. 5. P. 115–133.*

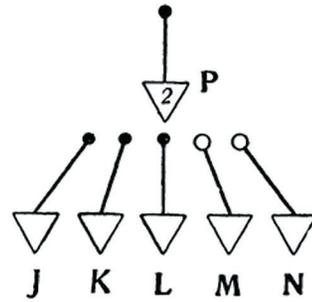
средствами двузначной логики. Авторы рассмотрели два вида нейронных сетей: без петель и с петлями, причем второй случай представляется более сложным вариантом. Под петлей в нейронной сети понимается цепочка нейронов, каждый элемент которой имеет связь через аксоны со следующим элементом, причем начало такой цепочки совпадает с ее концом. При изучении нейронных сетей Мак-Каллок и Питтс ввели ряд допущений, которые придали нейронной сети характер цифрового автомата.

Идеи Мак-Каллока – Питтса дополнил и развил С. К. Клини. Во введении к своей работе он указал, что исследует

нервные сети Мак-Каллока – Питтса не только с целью получить упрощенную модель нервной деятельности, но и с целью иллюстрации общей теории автоматов, включая роботы, вычислительные машины и т. п. ⁴⁴

При моделировании работы нейронной сети Клини активно оперирует понятиями алгебры логики. Например, на рисунках 1, 2 и 3, позаимствованных из его работы ⁴⁵, представлены простейшие модели нервных сетей, названных Клини конъюнктивной, дизъюнктивной и сетью задержки соответственно. Закрашенными точками изображены возбуждающие концевые пластины нейронов, проколотыми точками – тормозящие. Тело нейрона изображено треугольником, значение внутри которого показывает порог нейрона – минимальное количество возбуждающих пластин, которые должны действовать для возбуждения нейрона. Формулы под рисунком, записанные в символической алгебре логики, показывают условие возбужденности нейрона.

В продолжение темы, развитой в указанных двух работах, появилась статья Дж. фон Неймана «Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент» ⁴⁶. Основной задачей этой работы была попытка найти объяснение высокой надежности работы нейронной сети – головного мозга человека. Фон Нейман также моделирует работу мозга с помощью логики, однако отмечает, что основное отличие между логикой и представляющими ее автоматами – зависимость моделируемой нервной системы



$$P(t) \equiv [[J(t-1) \& K(t-1)] \vee \vee [J(t-1) \& L(t-1)] \vee [K(t-1) \& L(t-1)]] \& \overline{M(t-1)} \& \overline{N(t-1)}$$

Рис. 1. Модель конъюнктивной нервной сети

⁴⁴ См.: Клини С. К. Представление событий в нервных сетях и конечных автоматах // Автоматы... С. 18.

⁴⁵ Там же. С. 19.

⁴⁶ Нейман Дж., фон. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент // Автоматы... С. 68–139.

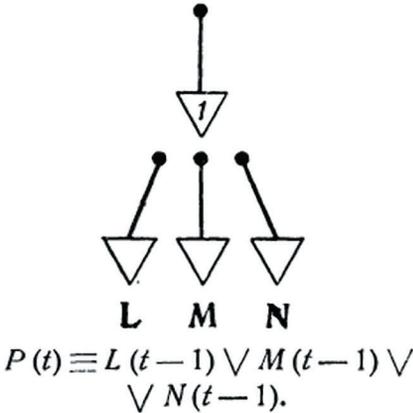


Рис. 2. Модель дизъюнктивной нервной сети

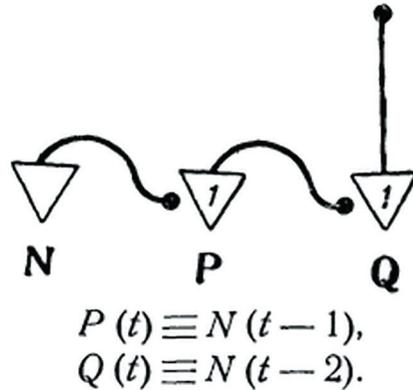


Рис. 3. Модель сети задержки

(автомата) от времени. Работа реальной системы всегда связана с последовательностью во времени, причем, по мнению фон Неймана, это является не недостатком, а, скорее, преимуществом.

Для повышения надежности функционирования схемы фон Нейман предложил дополнять ненадежный базис универсальным органом – смесителем, который реализует следующую булеву функцию: $m(a,b,c) = ab \vee bc \vee ac = (a \vee b)(b \vee c)(a \vee c)$. И с помощью итерационного метода Нейман показал, что любую булеву функцию $f(\bar{x})$ можно реализовать схемой, вероятность ошибки выхода которой не превосходит вероятности ошибки на выходе отдельно взятого элемента схемы. Другими словами, ненадежность схемы, во-первых, сопоставима с ненадежностью одного отдельно взятого элемента, а во-вторых, не зависит от числа входных значений функции.

В дальнейшем у подхода фон Неймана выявили ряд недостатков. Основным было то, что повышение надежности схем сопровождается существенным увеличением сложности схем (количества логических элементов схемы)⁴⁷. Кроме того, фон Нейман рассматривал только один вид неисправностей – инверсные (т. е. на выходе элемента, реализующего функцию $f(\bar{x})$, при ошибке возникает значение $f(\bar{\bar{x}})$). В реальных же системах неисправности на выходе и входе не ограничиваются инверсными значениями. Помимо инверсных неисправностей существуют другие их виды: константные типа 0, константные типа 1, «заедающие» неисправности (*stuck-at failures*), неисправности на выходе или входе элемента. В дальнейшем в продолжение темы, поднятой фон Нейманом, развилась целая область, посвященная математическому повышению надежности систем и синтезу надежных схем из ненадежных элементов. В ряде работ описаны способы повышения надежности систем в случае различных типов неисправностей и в разных базисах. Например, задачи, связанные с синтезом надежных схем из ненадежных

⁴⁷ Барсукова О. Ю. Синтез надежных схем, реализующих функции двузначной и трехзначной логики: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Пенза, 2014.

элементов, рассматривались в работах Р. Л. Добрушина, С. И. Ортюкова⁴⁸, Д. Улига⁴⁹, С. В. Яблонского⁵⁰. В настоящее время исследователи (М. А. Алехина⁵¹, В. В. Тарасов⁵², С. М. Грабовская⁵³, А. В. Васин⁵⁴) рассматривают разные виды неисправностей – инверсные, константные типа 0, константные типа 1, неисправности на выходе или входе элемента. Таким образом, модель, разработанная фон Нейманом, несмотря на некоторые ее недостатки, стала классическим эталоном моделирования работы головного мозга в дальнейшем и послужила отправной точкой для исследований в области надежности систем.

Применение моделей нейронных сетей при построении вычислительных машин

Широкую известность и признание математического сообщества фон Нейман получил также и за ряд других своих фундаментальных работ и идей. Одна из них – архитектура построения вычислительных машин (рис. 4).

Однако фон Нейман не связывал свои работы по моделированию работы головного мозга с идеей построения электронных-вычислительных машин. Классическая, «неймановская», архитектура вычислительных машин сильно отличается от архитектуры человеческого мозга, в первую очередь тем, что человеческий мозг обладает высокой степенью параллельности текущих процессов обработки данных, в то время как компьютер, построенный на принципах неймановской архитектуры, характеризуется последовательностью выполнения подзадач.

Одним из первых, кто отошел от неймановского принципа построения компьютеров, стал В. М. Глушков⁵⁵, который в начале второй половины

⁴⁸ Добрушин Р. Л., Ортюков С. И. О нижней оценке для избыточности самокорректирующихся схем из ненадежных функциональных элементов // Проблемы передачи информации. 1977. Т. 13. № 1. С. 82–89; Ортюков С. И. К вопросу о синтезе асимптотически безызбыточных самокорректирующихся схем из ненадежных функциональных элементов // Проблемы передачи информации. 1977. Т. 13. № 4. С. 3–8.

⁴⁹ Uhlig, D. Reliable Networks from Unreliable Gates with Almost Minimal Complexity // Lecture Notes in Computer Science. 1987. Vol. 278. P. 462–469.

⁵⁰ Яблонский С. В. Асимптотически наилучший метод синтеза надежных схем из ненадежных элементов // Vanach Center Publications. 1982. Т. 7. С. 11–19.

⁵¹ Алехина М. А. Синтез, надежность и сложность схем из ненадежных функциональных элементов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Пенза, 2004.

⁵² Тарасов В. В. К синтезу надежных схем из ненадежных элементов // Математические заметки. 1976. Т. 20. № 3. С. 391–400; Тарасов В. В. Некоторые свойства схем из ненадежных функциональных элементов // Методы дискретного анализа в теории управляющих систем: сборник трудов Института математики СО АН СССР. Новосибирск: [Б. и.], 1977. Вып. 31. С. 81–92; Тарасов В. В. Резервы обеспечения надежного синтеза логических схем // Кибернетика и системный анализ. 1992. № 3. С. 167–171.

⁵³ Грабовская С. М. Асимптотически оптимальные по надежности неветвящиеся программы с оператором условной остановки: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казань, 2012.

⁵⁴ Васин А. В. Асимптотически оптимальные по надежности схемы в 85 полных базисах из трехходовых элементов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Пенза, 2010.

⁵⁵ Виктор Михайлович Глушков (1923–1982), советский математик, кибернетик, академик АН СССР, пионер советской кибернетики, основатель Института кибернетики НАН Украины.

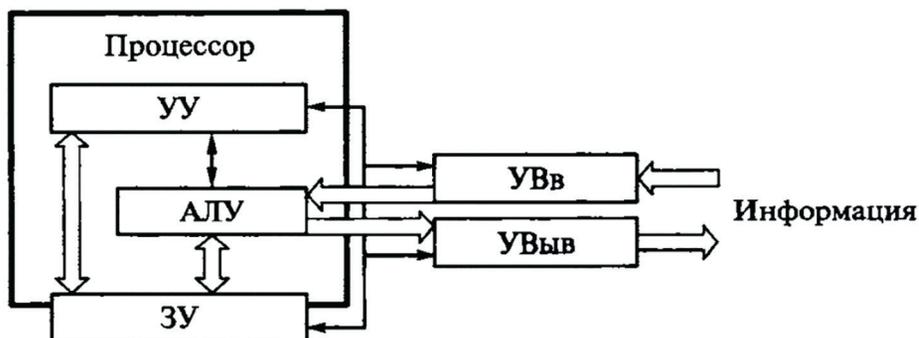


Рис. 4. Функциональная структура ЭВМ Дж. фон Неймана (Хорошевский В. Г. Архитектура вычислительных систем. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. С. 57)

XX в. обратил внимание на то, что работа неймановской ЭВМ и головного мозга человека сильно отличается. Как отмечается в работе В. И. Булкина, Глушков считал, что

машина сводит арифметические операции к логическим, а человеческий мозг – наоборот. Поэтому, значительно превосходя человека в скорости выполнения арифметических операций, машина не имеет такого превосходства в скорости выполнения операций логического типа ⁵⁶.

По этой причине стало необходимо глубоко изучить работу мозга, чтобы иметь возможность построить электронную вычислительную машину по подобию головного мозга. Впоследствии это направление исследований Глушков стал называть идеей мозгоподобных структур.

Мозгоподобные структуры представляют собой объединение большого количества (десятки миллионов) логических устройств, причем на количество соединений между ними не наложено никаких ограничений. Данные в таких устройствах должны обрабатываться в памяти с максимальным распараллеливанием информации. Глушков, отдавая себе отчет в недостаточности материально-технической базы, предлагал отходить от неймановской архитектуры поэтапно, реализуя компромиссные решения. Его идеи были представлены в ряде работ ⁵⁷.

В работе М. Ф. Бондаренко предложено понимать мозгоподобную структуру как математическую ⁵⁸. Обычно понятие «математическая структура» определяется как

⁵⁶ Булкин В. И. Мозгоподобные структуры – основа создания мозгоподобных ЭВМ // Штучный интеллект. 2011. № 4. С. 387.

⁵⁷ Глушков В. М. Некоторые проблемы синтеза цифровых автоматов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1961. № 3. С. 371–411; Глушков В. М. «Разумные машины» и умственная деятельность человека // Радянська школа. 1962. № 2. С. 87–91; Глушков В. М. Некоторые проблемы теории автоматов и искусственного интеллекта // Кибернетика. 1970. № 2. С. 3–13.

⁵⁸ Бондаренко М. Ф., Русакова Н. Е., Шабанов-Кушнарченко Ю. П. О мозгоподобных структурах // Бионика интеллекта. 2010. № 2 (73). С. 68–73.

родовое название, объединяющее понятия, общей чертой которых является то, что они применяются к множествам, природа элементов которых не определена. Чтобы определить структуру, задают отношения, в которых находятся элементы множеств (типовая характеристика структуры), а затем постулируют, что данные отношения удовлетворяют условиям – аксиомам структуры⁵⁹.

Однако применительно к человеку и компьютерной технике понятие мозгоподобной структуры предлагается сузить и отождествить его с конечной математической структурой.

Современные прикладные задачи в алгебре логики

Помимо проблем моделирования работы головного мозга современная алгебра логики нашла применение и в других сферах науки и жизни. В последние десятилетия активно развивается область квантовых вычислений и построения квантовых вычислительных систем. Основной единицей информации в квантовых компьютерах является так называемый кубит (*qubit*, от англ. *quantum bit*). Как показано в работе, посвященной введению в квантовое программирование⁶⁰, кубит можно рассматривать как квантово-механическое обобщение обычного бита, используемого в классических компьютерах, т. е. кубит – двумерная квантовая система.

В указанной работе рассматриваются алгоритмы квантовых вычислений и их реализация на квантовом оборудовании, причем при построении некоторых квантовых конструкций используются элементы классической алгебры логики. Например, квантовые простейшие элементы, которые используются для построения более сложных элементов, названы вентилями по аналогии с логическими элементами в классической алгебре логики, такими как логическое отрицание и логическое умножение. Даже при определении одного из обязательных свойств квантовых элементов, которым обладают далеко не все классические логические элементы, – обратимости – автор работы «Элементы квантовых вычислений»⁶¹ С. Акама оперирует понятиями классической алгебры логики. И хотя необходимое условие наличия обратимости для квантовых элементов накладывает некоторые ограничения, оно не делает квантовые вентили менее мощными, чем классические логические элементы, и поэтому авторы рассматривают квантовые вентили как обобщение классических обратимых вентилях. Кроме того, некоторые результаты для квантовых элементов были получены исходя из аналогичных результатов для классических логических функций. В работе Акамы отмечено, что каждое логическое значение функции может быть представлено универсальным вентилем на основе элементов логического умножения и логического отрицания или на элементе, реализующем штрих Шеффера (*NAND*);

⁵⁹ Структура (математическая). Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю. В. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1988. С. 568.

⁶⁰ *Abhijith, J., Adedoyin, A., Ambrosiano, J. et al.* Quantum Algorithm Implementations for Beginners // *arXiv:1804.03719v2*.

⁶¹ *Akama, S.* Elements of Quantum Computing. Berlin: Springer, 2015.

другими словами, любую логическую функцию можно разложить по некоторому базису. Авторы работы «Квантовые вычислительные сети»⁶² отмечают, что аналогичные результаты были получены и для квантовых вентилях. Любое преобразование можно разложить на последовательность вентилях, состоящую из однокубитных вентилях и элементов *CNot* (управляемое НЕ) или из универсальных трехкубитных вентилях Дойча.

Алгебра логики применяется не только при построении классических электрических схем, но и в области наносхемотехники. В работе В. Г. Горюхова⁶³ показано, как булева логика проделала путь от построения электрических цепей до применения в наносхемотехнике. С помощью комбинационной логической схемы на молекулярном уровне автор демонстрирует, как стандартные логические операции И, ИЛИ, НЕ реализуются с помощью молекулярных переключателей. Сигнал генерируется с помощью видимого или ультрафиолетового света, под действием которого в молекулярном элементе возникают химические реакции. Другими словами, молекулярный элемент фактически работает аналогично переключателю в контактно-релейных схемах.

Еще одним ярким примером использования булевой логики является область криптографии. В работе Т. Кьюзика и П. Стэник⁶⁴ представлен обзор приложений булевых функций в современной криптографии. Как отмечают авторы, логические функции являются объектом изучения криптографии более 50 лет, начиная с их применения в регистрах сдвига с линейной обратной связью. В конце 40-х гг. XX в. К. Шеннон предложил два метода достижения безопасности в криптосистемах — путаницу (выражается в нелинейности частей криптосистемы) и диффузию (достигается путем обеспечения того, что небольшое изменение входных данных приводит к значительному изменению выходных данных). Для реализации путаницы и диффузии очень хорошо подходят именно логические функции, и в указанной работе авторы показывают, каким образом можно выбрать те из этих функций, которые наиболее подходят для выполнения заявленной задачи.

В последние десятилетия развивается область логического анализа данных (*logical analysis of data, LAD*). Логический анализ данных — это особая методология анализа данных, которая объединяет идеи комбинаторики, оптимизации и алгебры логики. В работе Г. Алексе, С. Алексе, Т. Бонатеса и А. Когана⁶⁵ представлены основные понятия и модели логического анализа данных. Авторы отмечают, что изначально логический анализ данных был разработан для анализа наборов данных, элементы которых, подобно

⁶² Deutsch, D. Quantum Computational Networks. // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences. 1989. Vol. 425. No. 1868. P. 73–90.

⁶³ Горюхов В. Г. Логика и техника: от теории электрических цепей к наносхемотехнике // Логические исследования. 2012. Вып. 18. С. 97–126.

⁶⁴ Cusick, T. W., Stănică, P. Cryptographic Boolean Functions and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009.

⁶⁵ Alexe, G., Alexe, S., Bonates, T. O., Kogan, A. Logical Analysis of Data — the Vision of Peter L. Hammer // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2007. Vol. 49. No. 1–4. P. 265–312.

булевым переменным, могут принимать только двоичные значения (0 и 1). Однако, как оказалось позже, большинство реальных данных принимают вещественные значения. В связи с этим был предложен способ перевода вещественных значений в двоичные, названный бинаризацией⁶⁶. После бинаризации к наборам данных, принимающих уже двоичные значения, применяются методы логического анализа. Основные компоненты логического анализа данных подробно рассмотрены в упомянутой работе Г. и С. Алексе, Бонатеса и Когана⁶⁷.

Логический анализ данных нашел практическое применение в самых разных областях человеческой деятельности. Например, в области медицины он использовался для идентификации типа пневмонии по результатам компьютерной томографии, диагностики и прогнозирования развития раковых заболеваний, поражающих различные органы⁶⁸; с его помощью была рассмотрена задача идентификации наличия или отсутствия отказа в работе бортовой аппаратуры малых космических аппаратов⁶⁹; было показано применение логического анализа данных для предотвращения несчастных случаев на производстве, связанных с оборудованием (например, с ленточными конвейерами)⁷⁰; логический анализ данных применялся также в промышленности (обнаружение и диагностика неисправностей, прогнозирование неисправностей и т. д.), финансовом деле (рейтинг кредитного риска и системы ранжирования, инвестиции), для стохастической оптимизации⁷¹.

Переход от вещественных переменных к булевым, подобный бинаризации в логическом анализе данных, совершается и при построении логических нейронных сетей. В статье О. В. Фридман⁷² указывается, что, исходя из формализации множеств высказываний, дающей возможность обработки предикатов средствами алгебры логики, логическую нейронную сеть можно представить как нейронную сеть, базисом для которой является булева алгебра. В работе А. Б. Барского⁷³ рассматриваются вопросы, связанные с построением логических нейронных сетей. Среди прочего автор отмечает, что

⁶⁶ Boros, E., Hammer, P. L., Ibaraki, T., Kogan, A. Logical Analysis of Numerical Data // Mathematical Programming. 1997. Vol. 79. No. 1–3. P. 163–190.

⁶⁷ Alexe, Alexe, Bonates, Kogan. Logical Analysis of Data...

⁶⁸ Ibid.

⁶⁹ Скобцов В. Ю., Сычев А. А., Скобцов Ю. А. Логический анализ данных телеметрии бортовой аппаратуры малых космических аппаратов // Математические методы в технике и технологиях // Ред. А. А. Большаков. СПб.: СПбПУ, 2019. Т. 2. С. 39–42.

⁷⁰ Jocalyn, S., Chinniah, Y., Ouali, M. S., Yacout, S. Application of Logic Analysis of Data to Machinery-Related Accident Prevention Based on Scarce Data // Reliability Engineering and System Safety. 2017. No. 159. С. 223–236.

⁷¹ Lejeune, M., Lozin, V., Lozina, I., Ragabc, A., Yacout, S. Recent Advances in the Theory and Practice of Logical Analysis of Data // European Journal of Operational Research. 2019. No. 275. P. 1–15.

⁷² Фридман О. В. Логические нейронные сети: методы автоматического конструирования, редукции, извлечения правил // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10. № 9 (9). С. 97–108.

⁷³ Барский А. Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. М.: Финансы и статистика, 2004.

для определения нужной реакции на конкретную ситуацию можно использовать и классические электронные схемы при условии того, что разработчики предусмотрели все возможные ситуации, знают верное решение для каждой из них и обладают полной информацией о событиях. Однако в действительности приходится иметь дело с помехами и неопределенностями, которые уводят рассуждения из точной области в область ассоциативного мышления. Именно здесь и помогают нейросети. Благодаря замене однозначности наступления какого-либо события вероятностью (весом) его наступления и реализации аналогов булевых функций в отношении новых типов данных можно идентифицировать неопределенную ситуацию, т. е. определить, на что больше всего похожа рассматриваемая ситуация. Булевы логические функции реализуются нейронами, например, нейрон-конъюнктор и нейрон-дизъюнктор ⁷⁴.

Также можно упомянуть применение логических уравнений для формального описания условий работоспособности сложных технических структур помимо электрических схем. Например, в одной из рассматриваемых работ, посвященных применению общего решения систем логических уравнений, приведен пример использования систем логических уравнений для описания системы преобразования тепловой энергии в механическую ⁷⁵.

Современный концептуальный взгляд на проблему «думающих машин» изложен в работе А. Р. Ефимова ⁷⁶. Автор критически анализирует известный тест Тьюринга для оценки искусственного интеллекта и предлагает новые подходы к оценке на основе уже современных знаний. Показаны современные возможности и проблемы искусственного интеллекта. В целом обосновывается тезис о логичности сравнения ныне функционирующих и разрабатываемых систем искусственного интеллекта с возможностями детей на разных этапах их развития. Эта и другие подобные работы неизбежно ставят вопрос о границах искусственного интеллекта, в том числе и в прикладных областях (см., к примеру, фундаментальную работу С. Смейла, проблема № 18 ⁷⁷).

Одновременно М. Атья, британский математик, специалист по топологии и алгебраической геометрии, лауреат многих наград, в том числе премии Абеля и медали Филдса, выдвинул тезис, что все сколь-нибудь трудные задачи, скорее всего, алгоритмически неразрешимы. По-видимому, это так, и чем далее продвигается человек в удовлетворении своего любопытства или промышленного заказа, тем больше будет становиться неразрешимых задач,

⁷⁴ Аксенов С. В., Новосельцев В. Б. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии). Томск: Изд-во НТЛ, 2006.

⁷⁵ Черкесов Г. Н., Степанов Ю. В. Применение общего решения систем логических уравнений в задачах надежности // Надежность. 2015. № 2. С. 23–30.

⁷⁶ Ефимов А. Р. Посттьюринговая методология: разрушение стены на пути к общему искусственному интеллекту // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 2. С. 74–80.

⁷⁷ Smale, S. Mathematical Problems for the Next Century // Mathematics: Frontiers and Perspectives / V. Arnold, M. Atiyah, P. Lax, B. Mazur (eds.). Providence, RI: American Mathematical Society, 2000. P. 271–294.

ибо возможности человека ограничены возможностями его мозга и правил вывода.

Коротко об одном направлении развития исследований

В перечисленных современных проблемах реализации алгебры логики сама алгебра как таковая по-прежнему остается главным инструментом исследований. За время развития самого направления «математическая логика» представление о месте логики в системе знаний претерпело множественные трансформации, причем исследователи не теряют интереса к различным видам (или моделям) логики, от первого классического аристотелевского подхода до современных неклассических логик. Так, в ряде работ⁷⁸ предпринята попытка перейти в новые алгебры логики, как ассоциативные, так и не ассоциативные, коммутативные и некоммутиативные (по бинарным операциям конъюнкции и дизъюнкции), с «традиционными» и нетрадиционными законами отрицания (унарная операция). В некоторых алгебрах вводятся и противоположные элементы (унарная операция вычитания), и выделенные элементы (нуль-арная операция), так что алгебра логики расширяется до классической алгебраической системы «кольцо» (происходит синтез кольца и алгебры логики).

Свойства этих новых алгебр повторяют или сильно «коррелируются» со свойствами классической алгебры логики. Ставится и решается проблема тождеств в новых алгебрах. Новые алгебры являются теоретической основой построения надежных управляющих систем при создании и эксплуатации искусственного интеллекта, квантовых компьютеров, моделей систем кодирования и декодирования, логического анализа данных, моделей функционирования мозга.

References

- Abhijith, J., Adedoyin, A., Ambrosiano, J. et al. Quantum Algorithm Implementations for Beginners, *arXiv:1804.03719v2*.
- Akama, S. (2015) *Elements of Quantum Computing*. Berlin: Springer.
- Aksenov, S. V., and Novosel'tsev, V. B. (2006) *Organizatsiia i ispol'zovanie neuronnykh setei (metody i tekhnologii) [Organization and Use of Neural Networks (Methods and Technologies)]*. Tomsk: Izdatel'stvo NTL.
- Alekhina, M. A. (2004) *Sintez, nadezhnost' i slozhnost' skhem iz nenadezhnykh funktsional'nykh elementov: dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk [Synthesis, Reliability and Complexity of Circuits from Unreliable Functional Elements. Thesis for the Doctor of Physical and Mathematical Sciences Degree]*. Penza.

⁷⁸ Миронов В. В. Новые алгебры логики на индексированных логических множествах // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022. Сборник трудов V Международного научно-технического форума: в 10 т. / Ред. О. В. Миловзоров. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина, 2022. Т. 5. С. 29–43; Миронов В. В. Новые некоммутиативные алгебры логики // Там же. С. 43–53; Миронов В. В. Новые алгебры логики на логических словах и проблема тождеств // Там же. С. 54–68; Миронов В. В. Конечные, конечномерные и конечнопорожденные абелевы алгебры логики // Там же. С. 69–76.

- Alexe, G., Alexe, S., Bonates, T. O., and Kogan, A. (2007) Logical Analysis of Data – the Vision of Peter L. Hammer, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, vol. 49, no. 1–4, pp. 265–312.
- Barskii, A. B. (2004) *Neironnye seti: raspoznavanie, upravlenie, priniatie reshenii [Neural Networks: Recognition, Management, Decision Making]*. Moskva: Finansy i statistika.
- Barsukova, O. Iu. (2014) *Sintez nadezhnykh skhem, realizuiushchikh funktsii dvuznachnoi i trekhznachnoi logiki: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Synthesis of Reliable Circuits Implementing the Functions of Two-Digit and Three-Digit Logic. Thesis for the Candidate of Physical and Mathematical Sciences Degree]*. Penza.
- Biriukov, B. V., and Priadko, I. P. (2014) Primenenie logiki v gradostroitel'stve: trudnyi put' obretheniia [Application of Logic in Urban Planning: The Difficult Path of Finding], *Vestnik Moskovskogo universiteta, seriia 7: Filosofii*, no. 2, pp. 76–87.
- Biriukov, B. V., and Shakhov, V. I. (2007) Pervye prilozheniia logiki k tekhnike: Erenfest, Gersevanov i Shestakov. Ot primeneniia logiki k raschetu sooruzhenii i releinym skhemam k logicheskoi teorii razmernosti fizicheskikh velichin [The First Technical Applications of Logic: Ehrenfest, Gersevanov and Shestakov. From Using Logic in the Calculation of Structures and in Relay Circuits to the Logical Theory of the Dimensions of Physical Quantities], *Logicheskie issledovaniia*, no. 14, pp. 73–104.
- Bondarenko, M. F., Ruskova, N. E., and Shabanov-Kushnarenko, Iu. P. (2010) O mozgopodobnykh strukturakh [On the Brain-Like Structures], *Bionika intellekta*, no. 2 (73), pp. 68–73.
- Boros, E., Hammer, P. L., Ibaraki, T., and Kogan, A. (1997) Logical Analysis of Numerical Data, *Mathematical Programming*, vol. 79, nos. 1–3, pp. 163–190.
- Boole G. (1847) *The Mathematical Analysis of Logic*. Cambridge: MacMillan, Barclay & MacMillan and London: George Bell.
- Boole G. (1854) *An Investigation of the Laws of Thought*. Cambridge: MacMillan and Co.
- Bulkin, V. I. (2011) Mozgopodobnye struktury – osnova sozdaniia mozgopodobnykh EVM [Brain-Like Structures as a Basis for Brain-Like Computers], *Shtuchnyi intelekt*, no. 4, pp. 387–393.
- Cherkesov, G. N., and Stepanov, Iu. V. (2015) Primenenie obshchego resheniia sistem logicheskikh uravnenii v zadachakh nadezhnosti [Application of the Common Solution for the Systems of Logical Equations in Reliability Problems], *Nadezhnost'*, no. 2, pp. 23–30.
- Cusick, T. W., and Stănică, P. (2009) *Cryptographic Boolean Functions and Applications*. Amsterdam: Elsevier.
- Deutsch, D. (1989) Quantum Computational Networks, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 425, no. 1868, pp. 73–90.
- Dobrushin, R. L., and Ortiukov S. I. (1977) O nizhnei otsenke dlia izbytochnosti samokorrek-tiruiushchikh skhem iz nenadezhnykh funktsional'nykh elementov [On the Lower Estimate for Redundancy of Self-Correcting Circuits from Unreliable Gates], *Problemy peredachi informatsii*, vol. 13, no. 1, pp. 82–89.
- Domanskii, B. I. (1938) *Avtomaticheskoe upravlenie elektricheskimi ustanovkami i sistemami [Automated Management of Electrical Plants and Systems]*. Moskva: GONTI, Glavnaia redaktsiia energeticheskoi literatury.
- Druzhinin, Iu. O. (2019) Istoriia pervykh popytok primeneniia algebrы logiki dlia resheniia tekhnicheskikh zadach [The History of the Early Attempts at Applying the Algebra of Logic to Engineering Problems], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 40, no. 1, pp. 9–20.
- Efimov, A. R. (2020) Post'turingovaia metodologii: razrushenie steny na puti k obshchemu iskusstvennomu intellektu [Post-Turing Methodology: Breaking the Wall on the Way to Artificial General Intelligence], *Intellekt. Innovatsii. Investitsii*, no. 2, pp. 74–80.
- Fridman, O. V. (2019) Logicheskie neironnye seti: metody avtomaticheskogo konstruirovaniia, reduksii, izvlecheniia pravil [Logical Neural Networks: Methods of Automatic Construction, Reduction, Extraction of Rules], *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, vol. 10, no. 9 (9) pp. 97–108.
- Gersevanov, N. M. (1948) *Primenenie matematicheskoi logiki k raschetu sooruzhenii [The Application of Mathematical Logic to the Analysis of Structures]*, in: Gersevanov, N. M. *Sobranie sochinenii: v 2 t. [Collected Works: in 2 vols.]*. Moskva: Izdatel'stvo i tipolitografiia № 1 Stroivoenmorizdata, vol. 1, pp. 123–204.

- Glushkov, V. M. (1961) Nekotorye problemy sinteza tsifrovyykh avtomatov [Some Problems of Synthesis of Digital Automata], *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, no. 3, pp. 371–411.
- Glushkov, V. M. (1962) “Razumnye mashiny” i umstvennaia deiatel'nost' cheloveka [“Intelligent Machines” and Human Mental Activities], *Radians'ka shkola*, no. 2, pp. 87–91.
- Glushkov, V. M. (1970) Nekotorye problemy teorii avtomatov i iskusstvennogo intellekta [Some Problems of Automata Theory and Artificial Intelligence], *Kibernetika*, no. 2, pp. 3–13.
- Gorokhov, V. G. (2012) Logika i tekhnika: ot teorii elektricheskikh tsepei k nanoskhemotekhnike [Logic and Technology: From Electrical Circuit Theory to Nano-Circuitry], *Logicheskie issledovaniia*, no. 18, pp. 97–126.
- Grabovskaia, S. M. (2012) *Asimptoticheski optimal'nye po nadezhnosti nevetviashchiesia programmy s operatorom uslovnoi ostanovki: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Asymptotically Reliability-Optimal, Non-Branching Programs with Conditional Stop Operator. Thesis for the Candidate of Physical and Mathematical Sciences Degree]*. Kazan'.
- Iablonskii, S. V. (1982) Asimptoticheski nailuchshii metod sinteza nadezhnykh skhem iz nena-dezhnykh elementov [An Asymptotically Best Method of Synthesis of Reliable Circuits from Unreliable Gates], *Banach Center Publications*, vol. 7, pp. 11–19.
- Jocalyn, S., Chinniah, Y., Ouali, M. S., and Yacout, S. (2017) Application of Logic Analysis of Data to Machinery-Related Accident Prevention Based on Scarce Data, *Reliability Engineering and System Safety*, no. 159. C. 223–236.
- Khoroshevskii, B. G. (2008) *Arkhitektura vychislitel'nykh sistem. 2-e izd. [Architecture of Computing Systems. 2nd ed.]*. Moskva: Izdatel'stvo MGTU im. H. E. Baumana.
- Klini, S. K. (Kleene, S. C.) (1956) Predstavlenie sobytii v nervnykh setiakh i konechnykh avtomatakh [Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata], in: Shannon, K. E., and Makkarti, Dzh. (Shannon, C. E., and McCarthy, J.) (eds.) *Avtomaty [Automata Studies]*. Moskva: Izdatel'stvo inostrannoi literatury, pp. 15–67.
- Kolmogorov, A. N., and Iushkevich, A. P. (eds.) (1978) *Matematika XIX veka. Matematicheskaiia logika. Algebra. Teoriia chisel. Teoriia veroiatnostei [19th Century Mathematics. Mathematical Logic. Algebra. Number Theory. Probability Theory]*. Moskva: Nauka, vol. 1.
- Kudriavtsev, V. B. (1969) Algebra logiki [Algebra of Logic], in: Prokhorov, A. M. (ed.) *Bol'shaia sovetskaia entsiklopediia. V 30 t. 3-e izd. [Great Soviet Encyclopedia. In 30 vols. 3rd ed.]*. Moskva: Sovetskaia entsiklopediia, vol. 1, pp. 397–398.
- Kutiura, L. (2012) *Algebra logiki. 2-e izd. [Algebra of Logic. 2nd ed.]*. Moskva: Knizhnyi dom “LIBROKOM”.
- Kuzicheva, Z. A. (1982) Logicheskaiia programma Leibnitsa i ee rol' v istorii logiki i kibernetiki [Leibnitz's Logical Program and Its Role in the History of Logic and Cybernetics], *Voprosy kibernetiki*, no. 78, pp. 3–36.
- Kuzicheva, Z. A. (2009) Vliianie teorii releino-kontaktnykh skhem na razvitie matematicheskoi logiki [The Influence of the Relay-Contact Circuit Theory on the Development of Mathematical Logic], *Vestnik Moskovskogo universiteta, seriia 7: Filosofiia*, no. 1, pp. 53–63.
- Kuznetsov, O. P. (2019) Ogranichennaia ratsional'nost' i priniatie reshenii [Restricted Rationality and Decision Making], *Iskusstvennyi intellekt i priniatie reshenii*, no. 1, pp. 3–15.
- Leibnits, G. V. (Leibniz, G. W.) (1984) Ob universal'noi nauke, ili filosofskom ischislenii [On Universal Science, or The Philosophical Calculus], in: Leibnits, G. V. (Leibniz, G. W.) *Sochineniia v chetyrekh tomakh [Works in Four Volumes]*. Moskva: Mysl', vol. 3, pp. 494–500.
- Lejeune, M., Lozin, V., Lozina, I., Ragabc, A., and Yacout, S. (2019) Recent Advances in the Theory and Practice of Logical Analysis of Data, *European Journal of Operational Research*, no. 275, pp. 1–15.
- Letter, Peirce to A. Marquand, 1886 December 30 (1993), in: Kloesel, Ch. J. W. (ed.) *Writings of Charles S. Peirce: A Chronological Edition*. Bloomington and Indianapolis: Indiana University Press, vol. 5: 1884–1886, pp. 421–423.
- Levin, V. I. (2019) Viktor Ivanovich Shestakov i 80-letie otkrytiia logicheskoi teorii diskretnykh vychislitel'nykh i upravliaiushchikh ustroystv [Viktor Ivanovich Shestakov and the 80th Anniversary of the Discovery of Logical Theory of Discrete Computing and Control Devices], *Sistemy upravleniia, svyazi i bezopasnosti*, no. 2, pp. 54–86.

- Levin, V. I. (2018) Akira Nakashima i 80-letie otkrytiia logicheskoi teorii diskretnykh vychislitel'nykh i upravliaiushchikh ustroystv [Akira Nakashima and the 80th Anniversary of the Discovery of Logical Theory of Discrete Computing and Control Devices], *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti*, no. 4, pp. 296–322.
- Levin, V. I. (2019) Klod Elvud Shennon i 80-letie otkrytiia logicheskoi teorii diskretnykh vychislitel'nykh i upravliaiushchikh ustroystv [C. E. Shannon and the 80th Anniversary of the Discovery of Logical Theory of Discrete Computing and Control Devices], *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti*, no. 1, pp. 1–32.
- Levin, V. I., and Biriukov, B. V. (2009) Eshche raz ob istorii otkrytiia logicheskogo modelirovaniia tekhnicheskikh ustroystv [Revisiting the Discovery of Logic Modeling of Technical Devices], *Vestnik Moskovskogo universiteta, seriia 7: Filosofiia*, no. 1, pp. 37–52.
- McCulloch, W. S., and Pitts, W. (1943) A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, pp. 115–133.
- Mironov, V. V. (2022) Konechnye, konechnomernye i konechnoporozhdennye abelevy algebry logiki [Finite, Finite-Dimensional, and Finitely Generated Abelian Algebras of Logic], in: Milovzorov, O. V. (ed.) *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2022. Sbornik trudov V Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma: v 10 t. [Modern Technologies in Science and Education – STNO-2022. Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Forum: in 10 vols.]*. Riazan': Riazanskii gosudarstvennyi radiotekhnicheskii universitet im. V. F. Utkina, vol. 5, pp. 69–76.
- Mironov, V. V. (2022) Novye algebry logiki na indeksirovannykh logicheskikh mnozhestvakh [New Algebras of Logic on Indexed Logical Sets], in: Milovzorov, O. V. (ed.) *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2022. Sbornik trudov V Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma: v 10 t. [Modern Technologies in Science and Education – STNO-2022. Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Forum: in 10 vols.]*. Riazan': Riazanskii gosudarstvennyi radiotekhnicheskii universitet im. V. F. Utkina, vol. 5, pp. 29–43.
- Mironov, V. V. (2022) Novye algebry logiki na logicheskikh slovakh i problema tozhdestv [New Algebras of Logic on Logical Words and the Problem of Identities], in: Milovzorov, O. V. (ed.) *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2022. Sbornik trudov V Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma: v 10 t. [Modern Technologies in Science and Education – STNO-2022. Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Forum: in 10 vols.]*. Riazan': Riazanskii gosudarstvennyi radiotekhnicheskii universitet im. V. F. Utkina, vol. 5, pp. 54–68.
- Mironov, V. V. Novye nekommutativnye algebry logiki [New Noncommutative Algebras of Logic], in: Milovzorov, O. V. (ed.) *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2022. Sbornik trudov V Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma: v 10 t. [Modern Technologies in Science and Education – STNO-2022. Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Forum: in 10 vols.]*. Riazan': Riazanskii gosudarstvennyi radiotekhnicheskii universitet im. V. F. Utkina, vol. 5, pp. 43–53.
- Neiman, Dzh., fon (Neumann, J., von.) (1956) Veroiatnostnaia logika i sintez nadezhnykh organizmov iz nenadezhnykh komponent [Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components], in: Shannon, K. E., and Makkarti, Dzh. (Shannon, C. E., and McCarthy, J.) (eds.) *Avtomaty [Automata Studies]*. Moskva: Izdatel'stvo inostranoi literatury, pp. 68–139.
- Ortiukov, S. I. (1977) K voprosu o sinteze asimptoticheski bezyzbytochnykh samokorrektiruiushchikhsia skhem iz nenadezhnykh funktsional'nykh elementov [On the Problem of Synthesis of Asymptotically Non-Redundant Self-Correcting Circuits from Unreliable Functional Elements], *Problemy peredachi informatsii*, vol. 13, no. 4, pp. 3–8.
- Pikhorovich, V. D. (2019) *Ocherki istorii kibernetiki v SSSR. 2-e izd. [Essays on the History of Cybernetics in the USSR. 2nd ed.]*. Moskva: LENAND.
- Prokhorov, Iu. V. (ed.) (1988) *Matematicheskii entsiklopedicheskii slovar' [Mathematical Encyclopedic Dictionary]*. Moskva: Sovetskaia entsiklopediia.
- Revich, Iu., and Shilov, V. (2019) Proekt Kitova – Glushkova [The Project of Kitov and Glushkov], *Znanie – sila*, no. 5, pp. 61–67.
- Shannon, C. E., and McCarthy, J. (eds.) (1956) *Automata Studies*. Princeton: Princeton University Press (Annals of Mathematics Studies, vol. 34).

- Shennon, K. E., and Makkarti, Dzh. (Shannon, C. E., and McCarthy, J.) (eds.) (1956). *Avtomaty [Automata Studies]*. Moskva: Izdatel'stvo inostrannoï literatury.
- Shilov, V. V. (2008) Logicheskie mashiny i ikh sozdateli. Kratkaia, no prakticheski polnaia istoriia [Logical Machines and Their Creators. A Brief but Almost Complete History], *Informatsionnye tekhnologii*, no. 8 (prilozhenie), pp. 1–40.
- Shilov, V. V. (2014) *Istoriia logicheskikh mashin [The History of Logical Machines]*. Moskva: Knizhnyi dom "LIBROKOM".
- Skobtsov, V. Iu., Sychev, A. A., and Skobtsov, Iu. A. (2019) Logicheskii analiz dannykh telemekhniky bortovoi apparatury mal'kh kosmicheskikh apparatov [Logical Analysis of Onboard Telemetry Data from Small Space Vehicles], in: Bol'shakov, A. A. (ed.) *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiiakh [Mathematical Methods in Machines and Technologies]*, Sankt-Peterburg: SPbPU, vol. 2, pp. 39–42.
- Smale, S. (2000) Mathematical Problems for the Next Century, in: Arnold, V., Atiyah, M., Lax, P., and Mazur, B. (eds.) *Mathematics: Frontiers and Perspectives*. Providence, RI: American Mathematical Society, pp. 271–294.
- Tarasov, V. V. (1976) K sintezu nadezhnykh skhem iz nenadezhnykh elementov [On the Synthesis of Reliable Circuits from Unreliable Gates], *Matematicheskie zametki*, vol. 20, no. 3, pp. 391–400.
- Tarasov, V. V. (1977) Nekotorye svoïstva skhem iz nenadezhnykh funktsional'nykh elementov [Some Properties of Circuits from Unreliable Functional Elements], in: Vasil'ev, Iu. V. (ed.) *Metody diskretnogo analiza v teorii upravliaiushchikh sistem: sbornik trudov Instituta matematiki SO AN SSSR [Discrete Analysis Methods in the Theory of Control Systems: Proceedings of the Institute of Mathematics of the USSR Academy of Sciences]*, no. 31, pp. 81–92.
- Tarasov, V. V. (1992) Rezervy obespecheniia nadezhnogo sinteza logicheskikh skhem [Reserves Ensuring Reliable Synthesis of Logic Circuits], *Kibernetika i sistemnyi analiz*, no. 3, pp. 167–171.
- Tavanets, P. V. (ed.) (1960) *Primenenie logiki v nauke i tekhnike [Application of Logic in Science and Technology]*. Moskva: Izdatel'stvo AN SSSR.
- Turing, A. M. (1950) Computing Machinery and Intelligence, *Mind*, vol. 59, no. 236, pp. 433–460.
- Turing, A. M. (1953) Digital Computers Applied to Games, in: Bowden, B. V. (ed.) *Faster Than Thought. A Symposium on Digital Computing Machines*. London: Sir Isaac Pitman & Sons Ltd., pp. 286–310.
- Turing, A. M. (1969) Intelligent Machinery, in: Meltzer, B., and Michie, D. (eds.) *Machine Intelligence 5*. Edinburgh: Edinburgh University Press, pp. 3–23.
- Uhlig, D. (1987) Reliable Networks from Unreliable Gates with Almost Minimal Complexity, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 278, pp. 462–469.
- Vasin, A. V. (2010) *Asimptoticheski optimal'nye po nadezhnosti skhemy v 85 polnykh bazisakh iz trekhvkhodovykh elementov: dis. ... kand. fiz.- mat. nauk [Asymptotically Optimal Reliability Circuits in 85 Complete Bases of Three-Input Gates. Thesis for the Candidate of Physical and Mathematical Sciences Degree]*. Penza.
- Viner, N. (Wiener, N.) (1958) *Kibernetika, ili Upravlenie i svia'z v zhivotnom i mashine [Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine]*. Moskva: Sovetskoe radio.
- Whitesitt, J. E. (1961) *Boolean Algebra and Its Applications*. London: Addison – Wesley Publishing Company.
- Wiener, N. (1948) *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Paris: Hermann & C^{ie}, Cambridge, MA: The Technology Press and New York: John Wiley and Sons.

Received: October 4, 2021.