УДК 519.711

Акира Накашима и 80-летие открытия логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств

Левин В. И.

Актуальность. *В 2018 году исполнилось 80 лет с момента открытия логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств. Это открытие, совершенное тремя выдающимися учеными – А. Накашимой (Япония), К.Э. Шенноном (США) и В.И. Шестаковым (СССР), имело огромное значение для всей науки. Оно открыло дорогу новой научной дисциплине – кибернетике, составив ее теоретическую базу. Поэтому освоение фундаментальных результатов названных первооткрывателей остается актуальной задачей.* ***Цель статьи*** *– дать подробный обзор версии логической теории дискретных устройств, предложенной А. Накашимой, включая историю ее открытия, методологию, результаты и применения в различных областях науки и техники.* ***Метод.*** *Для достижения поставленной цели используется: 1) изучение работ ученого по первоисточникам и научно-исторической литературе, 2) изучение биографии ученого по воспоминаниям современников и научно-биографической литературе, 3) сравнение работ ученого с работами других ученых в данной области.* ***Результат****. Установлено, что А. Накашима был первым, кто показал возможность математического моделирования дискретных вычислительных и управляющих устройств с помощью булевой алгебры логики. Это позволило разработать формализованные методы анализа, синтеза и проектирования таких устройств, позволяющие создавать устройства большой сложности. Кроме того, ученый впервые сформулировал задачу математического моделирования динамики дискретных устройств, к решению которой исследователи подошли лишь спустя 30 лет.* ***Новизна.*** *Установлено, что А. Накашима является автором открытия, согласно которому булева алгебра логики является адекватным математическим аппаратом для представления схем дискретных устройств. Это открытие было опубликовано в сентябре 1935 года. Оно позволило в дальнейшем разработать конструктивные методы анализа, синтеза и проектирования схем дискретных вычислительных и управляющих устройств. Ученый также впервые предложил метод изучения не параллельно-последовательных (т.е. мостиковых) схем, метод разложения сложных схем на подсхемы для преодоления «проклятия размерности» и постановку задачи математического моделирования динамики схем.*

Ключевые слова: *логическая теория, дискретные устройства, булева алгебра.*

1. Введение

Теория переключательных (дискретных) схем сегодня является фундаментом для проектирования разнообразных логических цепей. Таким образом, она служит важнейшим средством построения современных цифровых вычислительных и управляющих устройств. Кроме того, она способствовала появлению ряда новых наук – кибернетики, информатики, искусственного интеллекта. Эта теория была открыта в далекие от нас 1930-е годы в виде теории релейных схем. Впоследствии вместо реле в качестве логических элементов в дискретных

Библиографическая ссылка на статью:
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. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/16-Levin.pdf.
Reference for citation:
Levin V. I. Akira Nakashima and 80th Anniversary of Discovery of Logical Theory of Discrete Computing and Control Devices. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 296–322. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/16-Levin.pdf (in Russian).

схемах стали использовать вакуумные трубки, диоды и транзисторы. Пока логические элементы были дорогими, а различные цепи с использованием этих элементов проектировались в небольших количествах, их логическое проектирование производилось вручную. В этих условиях интуиция и опыт человека имели большее значение, чем математическая теория проектирования. Однако затем прогресс в области полупроводниковых технологий привел к созданию БИС и СБИС. СБИС содержат слишком много вентилей, для того чтобы их можно было проектировать вручную. Так что в эпоху СБИС необходимость перехода от ручного проектирования к автоматизированному проектированию с использованием компьютеров стала очевидной. В связи с этим резко возросло значение теории дискретных схем. Именно об этой теории и истории ее создания, а также о вкладе в нее и жизненном пути выдающегося японского ученого Акиры Накашимы пойдет речь ниже.

Акира Накашима, 1960-е гг.

Выдающийся японский ученый Акира Накашима – первооткрыватель применения математической логики для представления, анализа, синтеза и проектирования переключательных (дискретных) схем, широко применяемых в цифровых вычислительных и управляющих устройствах. Несмотря на весьма короткий период времени, в течение которого он реально занимался данной областью научных исследований (1934–1941 гг.), он успел сделать очень много:

- открыл адекватность аппарата булевой алгебры логики релейно-контактным переключательным схемам;
- разработал методы формализованного анализа, синтеза и проектирования таких схем с помощью указанного аппарата;
- создал японскую научную школу по теории переключательных схем, из которой вышли классные ученые, обеспечившие Японии значительную независимость от Запада в создании отечественных цифровых вычислительных и управляющих устройств.

По результатам своих исследований А. Накашима опубликовал 13 научных статей – все в японских журналах (по-японски). Всего 10 из этих статей были переведены на английский язык, да и то часть (4 статьи) – в сильно сокращенном виде, и опубликованы в японских же журналах. Американские, европейские и советские (российские) ученые, как правило, не интересовались работами А. Накашимы и не ссылались (или ссылались неподобающим образом) на него. А ведь в этих работах не только впервые открыто то, что впоследствии было повторено, в той или иной форме, другими – логическая теория переключательных (релейно-контактных) схем, – но и сделано кое-что иное, до чего последующие ученые так и не дошли (например, начала динамики переключательных схем). Поэтому изучение и критический анализ работ А. Накашимы сегодня представляются весьма актуальными.

Предлагаемая статья представляет собой обзор основных работ А. Накашимы по логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств [1–4, 12, 14], рассматриваемых на фоне работ в этой области ученых других стран [5–8, 10, 11, 14–16]. При этом использованы работы [9, 17], посвященные истории развития логической теории дискретных устройств. Кроме того, использованы предшествующие работы автора, посвященные истории и анализу результатов А. Накашимы [18, 19]. Настоящая работа отличается от них значительно большим объемом и включает их в переработанном виде как составные части.

2. История появления пионерских работ А. Накашимы

В современной истории науки уже свыше полувека идет спор о том, кто же открыл применение логики для представления и проектирования дискретных вычислительных и управляющих устройств: американец К.Э. Шеннон (так считает большинство западных ученых) или русский В.И. Шестаков (так думают многие русские исследователи). Между тем, вполне возможно, что первооткрывателями не являются ни тот, ни другой, а им был выдающийся, но скромный и ныне почти забытый японский ученый по имени Акира Накашима. Восстановление его имени и трудов представляется важным и нужным делом.

Акира Накашима родился 5 января 1908 г. в Токио. В 1930 г. он окончил электротехнический факультет инженерного института Токийского Императорского университета. Сразу после окончания университета он поступил на службу в Японскую Электрическую Компанию. Здесь его направили в Исследовательский отдел, возглавлявшийся Шимазу Ясуширо. Этот отдел занимался проектированием релейных схем для использования в телемеханике и телерегистрации данных, в автоматических телефонных коммутаторах и т.д. В те далекие времена проектирование релейных схем в Японии, да и не только в ней, выполнялось на основе особого рода вдохновения талантливых инженеров-проектировщиков. Поэтому в области проводной связи инженеры-проектировщики релейных схем для коммутационной техники считались «темпераментными артистами», в отличие от чистых инженеров-связистов, которых считали интеллектуальными людьми. Находясь в этой среде, А. Накашима попытался сделать существовавшую практику проектирования релейных схем некоей теорией, путем определения основных свойств таких схем и изложения этих свойств в подходящей математической форме. И это был основной мотив, побудивший его начать это исследование в той области науки, которая сегодня называется теорией переключательных, или дискретных, схем.

А. Накашима начал свое исследование с детального изучения множества разнообразных релейных схем, спроектированных его предшественниками, и установления, на основе соответствующего анализа проектов, общих образцов схем и подходящих общих методов проектирования. Он начал строить свою теорию, исходя из того очевидного факта, что каждый контакт реле имеет сопротивление, которое является функцией времени, множество значений которой ограничено: это ноль или бесконечность. Он обозначил сопротивления контактов реле такими символами: A, B и C. Далее он стал обозначать сопротивление двух контактов A и B, соединенных последовательно, в виде $A+B$, а соединенных параллельно – в виде $A \cdot B$. Он ввел также символ «$=$» для обозначения эквивалентности двух функций, зависящих от сопротивлений. Путем принятия символов «$+$» и «$\cdot$», которые представляют соединения арифметических операторов, он пришел к схемной алгебре на этих операторах, в которой арифметические правила действий совершенно отличались от правил действий в традиционных алгебрах. Спустя несколько лет А. Накашима понял, что построенная им алгебра является булевой алгеброй логики. С помощью этих новых правил (логических законов) он построил теорию эквивалентных преобразований одних двухполюсных релейных схем в другие.

Летом 1934 г. А. Накашима, полностью разобравшийся в проблеме, начал реализацию большого проекта – систематическую публикацию своих идей и результатов в серии статей и выступлений под общим названием «Теория и практика релейных схем». Эти публикации появились на страницах «Журнала Японской электрической компании» в период с ноября 1934 г. по сентябрь 1935 г. Уже в сентябре 1935 г. в «Журнале Института инженеров телеграфии и телефонии Японии» № 150 – органе Телеграфного и телефонного общества Японии – появилась его первая большая научная статья с многообещающим названием «Теория построения релейных схем» [1]. Это была первая в мире научная публикация, в которой автор предпринял успешную попытку превратить проектирование релейных схем из искусства в науку. В статье впервые в качестве математического аппарата, служащего для описания релейных схем, использовались (правда, в неявной форме) некоторые положения булевой алгебры логики. Тогда же, в сентябре 1935 г., А. Накашима выступил с докладом по приглашению о теории синтеза релейных цепей на техническом совещании Телеграфного и телефонного общества Японии. Это было первое в мире публичное выступление по данной тематике перед инженерно-технической общественностью. В докладе были представлены необходимые определения и основы теории переключательных схем, включая логическую теорию де Моргана. Доклад перекликался с вышеупомянутой статьей автора. Впоследствии эта статья (доклад) в сокращенном виде была переведена на английский язык и опубликована в англоязычном японском журнале «Японская техника электросвязи», издаваемом Телеграфным и телефонным обществом Японии (№ 3, май 1936 г.) [2].

Вскоре после начала его исследований, в 1936 г., А. Накашима был переведен в отдел, занимавшийся чистой техникой связи. Ему пришлось теперь продолжать свои «родные» исследования в области теории релейных схем лишь по ночам у себя дома. В этой работе его поддерживали старший инженер Японской электрической компании Нива Ясуширо и один из его бывших коллег в области релейной коммутационной техники Масао Ханзава. А. Накашима совместно с М. Ханзавой разработали метод проектирования переключательных цепей с использованием алгебры, основы которой были заложены перед тем А. Накашимой. Они обозначали последовательное соединение контактов реле через «+» (логическое ИЛИ) и параллельное соединение через « · » (логическое И). Они интерпретировали схемы релейных цепей в форме логических уравнений, с использованием двух указанных символов и установленных ими дистрибутивного закона и закона исключения, и выполняли преобразование логических уравнений с помощью этих законов и теорем де Моргана. Они опубликовали статью, содержавшую изложение полученных ими результатов, в «Журнале Института инженеров телеграфии и телефонии Японии» № 165, в декабре 1936 г. (теория) и том же, но переименованном «Журнале Института инженеров электросвязи Японии» № 167, в феврале 1937 г. (примеры), который издавался Телеграфным и телефонным обществом Японии [3]. Сильно сокращенный английский перевод этой статьи был опубликован в уже упоминавшемся выше журнале «Японская техника электросвязи» № 9, в феврале 1938 г., Телеграфного и телефонного общества Японии [4]. В 1939 г. немецкая исследовательница Ханси Пиш продолжила исследование Накашимы, сославшись на его работы в своей статье «Принципы общей техники переключательных схем» («Архив электротехники», 1939, т. 33, №№ 10, 11) [5]. Это была первая в мире ссылка на работы по логической теории переключательных (дискретных) схем, причем этими работами оказались именно работы А. Накашимы.

Впоследствии, когда Япония вступила во Вторую Мировую войну (сентябрь 1940 г.), А. Накашима был еще раз перемещен на новую работу – на этот раз в отдел радаров и техники беспроводной связи. Здесь ему пришлось работать очень напряженно, в том числе сверхурочно и даже во время отпусков, так что он уже не мог продолжать дальше в какой бы то ни было форме свои исследования по теории переключательных схем. В общей сложности, А. Накашима занимался активно исследованиями в области теории переключательных (дискретных) схем лишь с 1934 по 1941 год, т.е. в течение всего 7 лет. За это время он опубликовал 13 научных статей на японском языке по этой тематике (9 единолично и 4 – совместно с М. Ханзавой). Только десять из них были переведены на английский язык, да и то часть (4 статьи) – в сильно сокращенном виде, причем все – в японском же англоязычном журнале «Японская техника электросвязи». Это сыграло свою роль в той малой известности, которой пользовался А. Накашима и его работы в мире.

После 2-й Мировой войны А. Накашима, как крупный организатор исследований и разработок, был назначен управляющим директором Японской электрической компании. Впоследствии он был переведен на должность президента Электрической компании Андо – одной из дочерних фирм Японской электрической компании. В этой должности он оставался до конца жизни. А. Накашима скончался 29 октября 1970 г. в возрасте 62 лет.

3. Реакция научного сообщества

А. Накашима был первым в мире человеком, который предпринял попытку создать формализованную, основанную на булевой алгебре логики, теорию переключательных схем и вытекающую из нее теорию формализованного анализа и синтеза таких схем. Он был также автором первой в мире опубликованной статьи и первого в мире приглашенного публичного доклада в данной области. Первая в мировой литературе ссылка на работы, выполненные в данной области, была также ссылкой на работы А. Накашимы (ссылка была сделана в упомянутой выше статье Х. Пиш 1939 г. [5]). Несмотря на столь очевидное первенство А. Накашимы, научная судьба его самого и его работ была несчастливой. Прежде всего, поскольку большая часть его научных работ (7 из 13) была опубликована в полном объеме только на японском языке, а обмен научными журналами накануне и в ходе 2-й мировой войны был затруднен, мировая научная общественность не была вовремя и в достаточной степени проинформирована об этих работах. В результате единоличным первооткрывателем логической теории переключательных схем в западном мире был признан американский ученый К.Э. Шеннон – просто потому, что главная его работа в этой области «Символический анализ релейных и переключательных схем», опубликованная в июне 1938 г. на английском языке в широко известном американском журнале «Trans. of the Amer. Inst. Electr. Eng.» [6], оказалась гораздо более доступной ученым мира. И это при том, что данная работа К.Э. Шеннона использовала те же логико-алгебраическое представление переключательных схем и булеву алгебру логики для их анализа и синтеза, что и работы А. Накашимы, опубликованные на 2-3 года раньше. Аналогичные представления переключательных схем использовал советский русский ученый В.И. Шестаков, первая публикация которого появилась лишь в 1941 г. [7], спустя 5-6 лет после первой публикации А. Накашимы. Заметим, что, несмотря на вышеуказанные трудности с обменом научными журналами, главные японские научные журналы, в том числе те, в которых публиковался А. Накашима, в предвоенные годы исправно доставлялись в ведущие библиотеки европейских стран, включая СССР, а также США и других государств. В этих условиях от ученых требовалась лишь добросовестность и корректность в работе с научной литературой и другими источниками, чтобы воссоздать правду истории науки. К сожалению, этих качеств не всегда хватало, даже у выдающихся ученых. Так, даже в 1949 г., уже во второй своей работе по теории переключательных схем [8] К.Э. Шеннон следующим образом впервые сослался на работы А. Накашимы: «Интерпретация булевой алгебры в терминах переключательных схем очень проста (Shannon C. A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits. Trans. AIEE, 57 (1938); Nakashima A. ...различные статьи в Nippon Electrical Communication Engineering, Apr, Sept, Nov, Dec. 1938...». Здесь нет ни одной ссылки на первоначальные публикации А. Накашимы, содержавшие основополагающие результаты по логической теории переключательных схем и появившиеся в 1935, 1936 и 1937 годах [1–4], т.е. до появления первой работы самого К.Э. Шеннона в 1938 г. [6]. Более того, не называется ни одна статья А. Накашимы! Кроме того, К.Э. Шеннон ссылается не на оригинальные японские публикации, а на их английские переводы, которые выходили с задержкой до одного года и больше. Что же касается В.И. Шестакова, то он вообще никогда не ссылался на исследования А. Накашимы (как, впрочем, и на работы К.Э. Шеннона), хотя и знал их. Далее, в 1948 г. в своем обзоре «Основания математики и математическая логика» [9] выдающийся советский историк математики и логики С.А. Яновская написала: «Эти результаты (возможность построения алгебры релейно-контактных схем на базе алгебры логики – В.Л.) были изложены в работе «Алгебра релейных схем», написанной В.И. Шестаковым в январе 1935 г. Работа не была опубликована, но легла в основу кандидатской диссертации В.И. Шестакова... наиболее существенная часть диссертации была опубликована в 1941 г... Дата (1935 г.) существенна, так как в 1938 г. в иностранных журналах был опубликован ряд статей по символическим методам представления структуры релейно-контактных схем и применению алгебры логики в качестве математического аппарата анализа и синтеза таких схем (см. статьи Nakasima в Nippon Electr. Comm. Eng. №№ 9, 10, 13, 14 (1938)». Здесь, в попытках доказать приоритет отечественного ученого, С.А. Яновская совершает невероятное – сравнивает рукопись В.И. Шестакова, которую научная общественность не могла видеть, с опубликованными работами А. Накашимы! При этом, как и у К.Э. Шеннона, ссылки даются не на оригинальные японские публикации, а на их более поздние английские переводы; если же говорить об оригинальных публикациях, то первая из них появилась не в 1938 г., а уже в 1935 г. – том самом, в котором у В.И. Шестакова предположительно была только рукопись! Большим контрастом с двумя приведенными примерами ссылок на работы А. Накашимы выглядит цитирование работ этого и других ученых в статьях немки Ханси Пиш [5]: «Эта работа родилась из: 1) Неопубликованных работ О. Плехля (Вена). 2) Трактата «Теория эквивалентного преобразования простых частичных путей в релейных схемах» Накасима А. и Ханзава М. // Nippon Electr. Comm. Eng. 9 (Febr. 1938). S. 32». Напомним, что эти огромные (больше 3 печатных листов) статьи немецкого ученого были представлены в журнал «Архив электротехники» для опубликования в феврале 1939 г., следовательно, писались не позже лета 1938 г., т.е. спустя всего 4 месяца после выхода в свет цитируемой английской версии статьи А. Накашимы и практически одновременно с поступлением журнала с этой статьей в немецкие публичные библиотеки. В этих условиях Х. Пиш могла и не ссылаться на А. Накашиму, и никто бы не упрекнул ее в этом. Однако профессиональная добросовестность и человеческая корректность заставили ее сделать эту ссылку – честь ей и хвала. К сожалению, подавляющее большинство исследователей, работавших в области теории переключательных схем, никогда не ссылались на А. Накашиму – ни в 1930-е годы, когда его статьи стали появляться в научных журналах, ни спустя десятилетия, а если изредка ссылались, то делали это неподобающим образом (см. два приведенных выше примера). Причем так вели себя не только западные и советские ученые (что еще как-то можно понять – как-никак, патриотизм!), но и японские!

4. Анализ первой работы А. Накашимы (сентябрь 1935 г.)

Первая важная научная работа А. Накашимы «Теория построения релейных схем» была опубликована по-японски в ежемесячном «Журнале Института инженеров телеграфии и телефонии Японии», № 150, в сентябре 1935 г., издававшемся Телеграфным и телефонным обществом Японии. Эта работа представляет собой статью очень большого объема (свыше 5 издательских листов), больше похожую на монографию [1]. Позже сокращенная версия этой статьи (объемом 2,5 издательских листа) в переводе на английский язык появилась в издававшемся тем же обществом англоязычном японском журнале «Японская техника электросвязи» № 3, в мае 1936 г. [2]. Эта статья была первой в мире работой, в которой для описания релейных схем использовались (пока еще в неявной форме) некоторые элементы булевой алгебры логики.

Статья содержит 9 глав. В главе 1 рассматривается фундаментальная идея релейных схем, вопросы формирования их структуры, виды реле и их характеристики, общие характеристики релейных схем, функции релейных схем, особенности электромагнитных релейных схем. В главе 2 изучаются свойства и назначение элементов реле, способы управления энергией в реле, реализуемые в реле виды функции времени. В главе 3 описываются виды контактов релейно-контактных схем и их символические обозначения, взаимоотношения между различными видами контактов, даются различные определения, относящиеся к контактам, а также формулируются 4 теоремы, связывающие процессы функционирования контактов различных видов. В главе 4 – самой большой – вводится понятие простого частичного пути из контактов релейно-контактной схемы, дается классификация путей с соответствующими определениями, соотношение различных типов путей, а также формулируется 14 теорем, описывающих зависимость процессов функционирования путей различных типов. В главе 5 рассматриваются сложные частичные пути и даются общие соображения, позволяющие свести изучение функционирования сложных путей к изучению функционирования простых путей. В главе 6 рассмотрены вопросы анализа путей передачи энергии в релейно-контактной схеме – таких путей в общем случае может быть несколько. В главе 7 дается классификация возможных видов базовых (релейных) функций реле и их временных функций. В главе 8 приведены некоторые типовые релейные схемы, заимствованные из практики проектирования схем. В главе 9 подведены итоги проведенного исследования и сделаны выводы. Весь этот огромный материал отразил четырехлетний (1930–1934 гг.) опыт работы А. Накашимы в исследовательском отделе Японской Электрической компании, который занимался проектированием релейных схем. Однако нас из всего этого материала будут интересовать только главы 3 и 4, посвященные вопросам формализации изучения структур релейно-контактных схем, поскольку именно эта формализация и привела автора статьи к использованию аппарата алгебры логики для изучения релейных схем.

А. Накашима выделяет два возможных состояния контакта реле: замкнутое (электрическое сопротивление между полюсами контакта равно 0, обозначение состояния 0) и разомкнутое (сопротивление равно ∞, обозначение состояния 1). Аналогично выделяются два возможных состояния двухполюсной релейно-контактной схемы: замкнутое (сопротивление между полюсами схемы равно 0, обозначение состояния 0) и разомкнутое (сопротивление равно ∞, обозначение состояния 1). Далее вводится понятие рабочей функции контакта – двоичной функции двоичного аргумента, определяющей зависимость состояния контакта от воздействия на него (воздействие есть – 1, воздействия нет – 0). Так, для размыкающего контакта рабочая функция $y = x$, а для замыкающего $y = 1 - x$. Здесь x – воздействие, y – состояние контакта. Если разделять состояния контакта реле не на проводящие $(y = 0)$ и непроводящие $(y = 1)$, а на рабочие (у замыкающего контакта $y = 0$, у размыкающего $y = 1$) и нерабочие (соответственно $y = 1$ и $y = 0$), то для каждого контакта получается две функции, описывающие его поведение: функция включения $y_{\text{вкл}}$ и функция выключения $y_{\text{выкл}}$. При этом для размыкающего контакта $y_{\text{р,вкл}} = x,\ y_{\text{р,выкл}} = 1 - x$, а для замыкающего $y_{\text{з,вкл}} = 1 - x,\ y_{\text{з,выкл}} = x$. В общем случае контакты реле конструкционно могут быть сложнее простых замыкающих и размыкающих контактов, однако функционально (т.е. по виду их рабочих функций, а также функций включения и выключения) они ведут себя лишь одним из следующих двух способов: как замыкающий контакт или как размыкающий контакт. Это позволяет вводить классы контактов реле и изучать свойства этих классов и их отношений, опираясь на понятия указанных функций. Так, два контакта называются эквивалентными, если их рабочие функции, а также функции включения и выключения соответственно, совпадают. Аналогично, два контакта называются взаимно обратными, если их рабочие функции, а также функции включения и выключения соответственно, противоположны по значению (т.е. если функция одного контакта равна 1 (0), то соответствующая функция второго контакта равна 0 (1). Свойства введенных классов контактов содержатся в следующих утверждениях статьи.

Теорема 1. Функция включения одного из двух взаимно обратных контактов равна функции выключения другого контакта.

Теорема 2. Любой контакт может быть заменен эквивалентным ему контактом или эквивалентной ему (по всем функциям поведения) двухполюсной схемой.

Теорема 3. Любой контакт, взаимно обратный с данным, имеет эквивалентный контакт или эквивалентную (по всем функциям поведения) двухполюсную схему.

Теорема 4. Два контакта a и b, эквивалентные двум взаимно обратным контактам A и B, взаимно обратны.

А. Накашима не приводит доказательств указанных теорем. Но это нетрудно сделать. Справедливость теоремы 2 очевидна. Справедливость теоремы 1 следует из того, что по определению взаимной обратности контактов $y_{1,\text{вкл}} = 1 - y_{2,\text{вкл}}$, $y_{1,\text{выкл}} = 1 - y_{2,\text{выкл}}$, а соотношение между функциями включения и выключения одного и того же контакта таково (см. выше): $y_{1,\text{вкл}} = 1 - y_{1,\text{выкл}}$, $y_{2,\text{вкл}} = 1 - y_{2,\text{выкл}}$. Из выписанных соотношений получаем: $y_{1,\text{вкл}} = y_{2,\text{выкл}}$, $y_{1,\text{выкл}} = y_{2,\text{вкл}}$, что и требовалось доказать. Справедливость теоремы 3 следует из того, что любой контакт B, взаимно обратный с данным контактом A, имеет реализованную рабочую функцию $y_{B,\text{раб}} = 1 - y_{A,\text{раб}}$, которую точно так же можно реализовать еще раз в точно таком же или эквивалентно преобразованном виде, получив новый контакт C с рабочей функцией $y_{C,\text{раб}} = y_{B,\text{раб}}$, эквивалентный контакту B. Справедливость теоремы 4 вытекает из того, что по условию эквивалентности $y_{a,\text{раб}} = y_{A,\text{раб}}$ и $y_{b,\text{раб}} = y_{B,\text{раб}}$, а по условию взаимной обратности $y_{B,\text{раб}} = 1 - y_{A,\text{раб}}$. В результате получаем $y_{b,\text{раб}} = 1 - y_{a,\text{раб}}$, что доказывает взаимную обратность контактов a и b.

Рис. 1.

Все перечисленные теоремы – и это очень важно – имеют логическую природу и могут быть выведены логическими методами и записаны в логической форме. Начнем с теоремы 1. Используем логическую булеву операцию отрицания $y = \bar{x} = 1$ (при $x = 0$) или 0 (при $x = 1$). Тогда четыре соотношения в вышеприведенном доказательстве теоремы 1 можно записать в логической форме: $y_{1,\text{вкл}} = \bar{y}_{2,\text{вкл}}$, $y_{1,\text{выкл}} = \bar{y}_{2,\text{выкл}}$, $y_{1,\text{вкл}} = \bar{y}_{1,\text{выкл}}$, $y_{2,\text{вкл}} = \bar{y}_{2,\text{выкл}}$. Записанным логическим соотношениям взаимно-однозначно соответствует логический граф рис. 1, в котором функции, расположенные в одной вершине, равны, а расположенные в разных вершинах, связаны операцией логического булева отрицания. Из графа, представленного на рис. 1 видно, что $y_{1,\text{вкл}} = y_{2,\text{выкл}}$, $y_{1,\text{выкл}} = y_{2,\text{вкл}}$. Это и доказывает, что функция включения (выключения) одного контакта равна функции выключения (включения) другого контакта, т.е. теорема 1 верна. Теперь о теореме 2. По определению, эквивалентные контакты имеют совпадающие рабочие функции $y_{\text{раб}}$. Но по логическому закону тождества $y_{\text{раб}} \equiv y_{\text{раб}}$. Так что, если в некоторой релейно-контактной схеме произвольный контакт с какой-либо рабочей функцией $y_{\text{раб}}$ заменить эквивалентным ему контактом с точно такой же рабочей функцией $y_{\text{раб}}$, поведение схемы не изменится. Значит, такая замена возможна, что и доказывает теорему. Перейдем к теореме 3. Пусть данный контакт A имеет рабочую функцию $y_{A,\text{раб}}$. Тогда любой взаимно обратный с A контакт B имеет рабочую функцию $y_{B,\text{раб}} = 1 - y_{A,\text{раб}} = \bar{y}_{A,\text{раб}}$, где $\bar{y}$ – булево логическое отрицание y. Полученную логическую функцию $y_{B,\text{раб}}$ можно реализовать многими способами, получая каждый раз контакт или релейно-контактную схему, эквивалентные исходному контакту B. Что и требовалось доказать. Наконец, о теореме 4. По условию эквивалентности контактов a и A, b и B имеем $y_{a,\text{раб}} = y_{A,\text{раб}}$, $y_{b,\text{раб}} = y_{B,\text{раб}}$, а по условию взаимной обратности A и B получается $y_{B,\text{раб}} = 1 - y_{A,\text{раб}} = \bar{y}_{A,\text{раб}}$. Соединяя предыдущие и последнее равенство, находим $y_{b,\text{раб}} = \bar{y}_{a,\text{раб}}$, что и доказывает взаимную обратность контактов a и b.

Продемонстрированная логическая сущность теорем 1–4 означает, что эти, по существу логические, утверждения были сформулированы А. Накашимой не на их естественном логико-алгебраическом языке, а на инженерно-техническом языке проектировщиков переключательных (релейно-контактных) схем, среди которых он работал. Конечно, их логическая сущность от этого не изменилась. Сказанное также полностью относится к излагаемым ниже теоремам 5–16 рассматриваемой статьи.

А. Накашима рассматривает только два типа соединений контактов – последовательные и параллельные. В соответствии с этим он выделяет в релейно-контактных схемах простые частичные пути из контактов, представляющие собой полностью однотипные соединения контактов – последовательное (простой последовательный частичный путь) или параллельное (простой параллельный частичный путь). Если же в последовательном соединении контактов встречаются также блоки из параллельно соединенных контактов, такой путь называется сложным последовательным частичным путем. Аналогично, если в параллельном соединении контактов есть ветви с последовательно соединенными контактами, имеем сложный параллельный частичный путь. Два простых частичных пути называют взаимно обратными по контактам, если один получен из другого путем замены всех контактов соответствующими обратными контактами. Два простых частичных пути называют взаимно обратными по связи, если один получен из другого заменой простого последовательного частичного пути простым параллельным частичным путем из тех же контактов или наоборот. Два простых частичных пути называют дважды взаимно обратными, если они взаимно обратны и по контактам, и по связи. Рабочие функции, а также функции включения и выключения путей вводятся аналогично этим функциям контактов. Свойства введенных отношений простых частичных путей релейно-контактных схем содержатся в следующих утверждениях.

Теорема 5. Функция включения простого частичного пути равна функции выключения другого простого частичного пути, взаимно обратного с первым по контактам.

Теорема 6. Простой частичный путь, взаимно обратный по контактам с некоторым простым частичным путем, и простой частичный путь, взаимно обратный по связи с ним же, дважды взаимно обратны.

Теорема 7. Простой частичный путь, взаимно обратный по контактам с некоторым простым частичным путем, и простой частичный путь, дважды взаимно обратный с ним же, взаимно обратны по связи.

Теорема 8. Простой частичный путь, взаимно обратный по связи с некоторым простым частичным путем, и простой частичный путь, дважды взаимно обратный с ним же, взаимно обратны по контактам.

Теорема 9. Рабочие функции дважды взаимно обратных простых частичных путей сопряжены друг с другом (т.е. противоположны по значению).

Теорема 10. Функции включения и выключения взаимно обратных по связи простых частичных путей взаимно сопряжены (т.е. функция включения одного пути сопряжена с функцией выключения другого).

Теорема 11. Пусть имеются две пары простых частичных путей, которые попарно дважды взаимно обратны. Тогда, взяв два набора простых частичных путей, так чтобы в каждом наборе оказалось по одному пути из каждой пары, и, соединив два пути каждого набора в один путь инверсно (в одном наборе – последовательно, в другом – параллельно), получим два соединенных пути, дважды взаимно обратных друг другу.

Теорема 12. Порядок следования контактов из имеющегося набора контактов в любом простом частичном пути может быть произвольным образом изменен – рабочая функция пути от этого не изменится.

Теорема 13. Включение (выключение) простого частичного пути последовательного типа, состоящего только из замыкающих контактов, происходит в момент включения последнего по времени (первого по времени) контакта.

Теорема 14. Включение (выключение) простого частичного пути параллельного типа, состоящего только из замыкающих контактов, происходит в момент включения первого по времени (последнего по времени) контакта.

Теорема 15. В простом частичном последовательном или параллельном пути, состоящем их одинаковых контактов, порядок срабатывания контактов (с учетом моментов их срабатывания) можно произвольным образом изменить – рабочая функция от этого не изменится.

Теорема 16. В простом частичном последовательном или параллельном пути, состоящем из двух взаимно обратных контактов, обмен моментами срабатывания контактов, совместно с операцией взаимно обратного преобразования пути по контактам не изменяет рабочую функцию пути.

Поскольку перечисленные теоремы 5–16 формально не были доказаны А. Накашимой, приведем эти доказательства. Используем опять логический метод. Начнем с теоремы 5. Пусть функция включения первого пути $y_{1,\text{вкл}} = f(a,b,c)$, где a,b,c – состояния контактов при включении. Ясно, что f – некоторая булева логическая функция. Тогда функция включения второго пути, как взаимно обратного с первым по контактам, $y_{2,\text{вкл}} = f(\bar{a},\bar{b},\bar{c})$, где $\bar{a},\bar{b},\bar{c}$ – булевы логические отрицания a,b,c. Отсюда функция выключения второго пути $y_{2,\text{выкл}} = f(\bar{\bar{a}},\bar{\bar{b}},\bar{\bar{c}})$, что по закону двойного отрицания дает $y_{2,\text{выкл}} = f(a,b,c) = y_{1,\text{вкл}}$, что и требовалось. Теорема 6. Пусть исходный простой частичный путь – последовательный. Тогда его рабочая функция, очевидно, $y_{1,\text{раб}} = a \vee b \vee c$, где $\vee$ – булева логическая дизъюнкция. Обратный с ним по контактам простой частичный путь имеет рабочую функцию $y_{2,\text{раб}} = \bar{a} \vee \bar{b} \vee \bar{c}$, а обратный по связи путь – рабочую функцию $y_{3,\text{раб}} = a \wedge b \wedge c$, где $\wedge$ – булева логическая конъюнкция. Но по закону де Моргана $\overline{a \wedge b \wedge c} = \bar{a} \vee \bar{b} \vee \bar{c}$, так что

$\bar{y}_{3,\text{раб}} = y_{2,\text{раб}}$, что и требовалось. Случай параллельного исходного простого пути рассматривается аналогично. Теоремы 7 и 8 доказываются аналогично теореме 6. Теорема 9. Пусть исходный простой частичный путь – последовательный; его рабочая функция $y_{1,\text{раб}} = a \vee b \vee c$. Находящийся с ним в дважды взаимно обратном соотношении простой частичный путь имеет, очевидно, рабочую функцию $y_{2,\text{раб}} = \bar{a} \wedge \bar{b} \wedge \bar{c}$. По закону де Моргана $\overline{a \vee b \vee c} = \bar{a} \wedge \bar{b} \wedge \bar{c}$, так что $\bar{y}_{1,\text{раб}} = y_{2,\text{раб}}$, теорема доказана. Теорема 10. Пусть простой частичный путь 1 последовательный. Тогда взаимно обратный с ним по связи путь 2 параллельный. Функции включения и выключения этих путей $y_{1,\text{вкл}} = a \vee b \vee c,\ y_{1,\text{выкл}} = \bar{a} \vee \bar{b} \vee \bar{c}$, $y_{2,\text{вкл}} = a \wedge b \wedge c,\ y_{2,\text{выкл}} = \bar{a} \wedge \bar{b} \wedge \bar{c}$. Отсюда с учетом теоремы де Моргана имеем $\bar{y}_{1,\text{вкл}} = y_{2,\text{выкл}}$, $\bar{y}_{2,\text{вкл}} = y_{1,\text{выкл}}$, что и требовалось. Теорема 11 доказывается аналогично теореме 9, на основе закона де Моргана, описывающего соотношения рабочих функций дважды взаимно обратных путей. Теорема 12. Ее содержание эквивалентно коммутативным законам для дизъюнкции и конъюнкции булевой алгебры логики, поскольку рабочая функция простого частичного последовательного (параллельного) пути описывается указанной дизъюнкцией состояний контактов пути, откуда и следует ее справедливость. Теорема 13. Справедливость теоремы следует из того, что рабочая функция указанного в ней пути есть дизъюнкция $y_{\text{раб}} = a \vee b \vee c$, которая становится равной 0 (равной 1) лишь когда все состояния контактов a,b,c стали равны 0 (когда состояние хотя бы одного контакта a,b,c стало равно 1). Справедливость теоремы 14 следует из того, что рабочая функция параллельного пути есть конъюнкция $y_{\text{раб}} = a \wedge b \wedge c$, которая обращается в 0 (обращается в 1) лишь когда состояние хотя бы одного контакта a,b,c стало равно 0 (когда состояния всех контактов a,b,c стали равны 1). Справедливость теоремы 15 следует из того, что в простом последовательном или параллельном пути с одинаковыми контактами рабочая функция полностью определяется моментами первого и последнего срабатываний контактов, а эти моменты при указанных в теореме изменениях не меняются. Теорема 16 следует из того, что указанные в ней два преобразования пути взаимно уничтожаются, так что работа пути и, следовательно, его рабочая функция остаются неизменными. Заметим, что, в отличие от теорем 1–12, описывающих статику (установившееся поведение) релейно-контактных схем, теоремы 13–16 описывают их динамику (временное поведение).

Проведенный анализ показывает, что в статье [1] впервые в мире в развернутой форме показана принципиальная возможность адекватного формализованного моделирования структуры и функционирования в статическом режиме переключательных (релейно-контактных) схем средствами булевой алгебры логики. Соответствующие утверждения (теоремы 1–16) были сформулированы автором статьи [1] на техническом языке проектировщиков схем. Однако эти утверждения без труда переводятся на их естественный логико-алгебраический язык, что и проделано нами выше.

5. Анализ второй работы А. Накашимы (декабрь 1936 г.)

Вторая важная научная работа А. Накашимы «Теория эквивалентного преобразования простых частичных путей в релейных схемах», как и первая, была написана по-японски и опубликована в том же «Журнале Института инженеров телеграфии и телефонии Японии» № 165, в декабре 1936 г. (теория) и его переименованной версии – «Журнале Института инженеров электросвязи Японии» № 167, в февраль 1937 г. (примеры) [3]. На этот раз работа была подготовлена в соавторстве с помощником и бывшим коллегой А. Накашимы по отделу релейных схем – М. Ханзавой. Эта работа относительно небольшого объема – около 2,5 печатных листов. Ее сильно сокращенная версия вышла в переводе на английский язык с большой задержкой – лишь в феврале 1938 г. – в том же, что и перевод первой статьи, англоязычном японском журнале «Японская техника электросвязи», № 9, в феврале 1938 г. [4]. В этой статье уже в явном виде применяется математический аппарат булевой алгебры логики для математического моделирования как структуры, так и функционирования переключательных (релейно-контактных) схем.

А. Накашима прежде всего строит схемную алгебру для моделирования схем. Вначале вводятся базовые алгебраические операции сложения и умножения двоичных $(0,1)$-переменных

$$X = A + B + C, \quad Y = A \cdot B \cdot C \tag{1}$$

для моделирования соответственно последовательного и параллельного соединения имеющихся простых частичных путей с целью получения новых путей – простых или сложных. Ясно, что введенные операции должны адекватно отражать функционирование моделируемых соединений – последовательного и параллельного. Поэтому, так как последовательное соединение замкнуто, если замкнуты все его звенья, и разомкнуто, если разомкнуто хотя бы одно звено, а параллельное соединение замкнуто, если замкнуто хотя бы одно его звено, и разомкнуто, если разомкнуты все звенья, мы получаем единственно возможное определение вводимых операций (1). А именно, сумма равна 1, если хотя бы одно слагаемое равно 1, и равна 0, если все слагаемые равны 0; произведение равно 0, если хотя бы один сомножитель равен 0, и равно 1, если все сомножители равны 1. Итак, введенные для адекватного моделирования последовательного и параллельного соединения путей операции суммирования X и умножения Y на самом деле являются булевыми логическими операциями дизъюнкции и конъюнкции. Отсюда автоматически вытекают все алгебраические законы, включающие две введенные операции и хорошо известные из булевой алгебры логики. Однако А. Накашима тогда еще не знал, что он в своей работе переоткрыл эту алгебру, и потому он доказывает для нее дистрибутивный закон

$$A \cdot (B + C) = AB + AC, \quad (A \cdot B) + C = (A + C) \cdot (B + C) \tag{2}$$

(методом подстановок), а в отношении других законов – ассоциативного и коммутативного – ограничивается замечанием, что они могут быть доказаны аналогично. Для всех этих законов приводятся их схемные аналоги, позволяющие выполнять эквивалентные преобразования релейно-контактных схем и их упрощение.

Далее формулируются и записываются в алгебраической форме другие логические законы:

– закон идемпотентности

$$A + A + \ldots + A = A, \quad A \cdot A \cdot \ldots \cdot A = A; \tag{3}$$

– закон исключенного третьего

$$A + \overline{A} = 1_p; \tag{4}$$

– закон противоречия

$$A \cdot \overline{A} = 0_s. \tag{5}$$

В (4) и (5) $\overline{A}$ означает по А. Накашиме операцию перехода от одного простого частичного пути к другому – дважды взаимно обратному – и результат этого перехода в виде новой рабочей функции. Но согласно теореме 9 первой статьи А. Накашимы (см. п. 4) новая рабочая функция противоположна по значению старой. Таким образом, $\overline{A}$ есть на самом деле булева логическая операция отрицания. Символ 1_p в (4) означает константу 1, а символ 0_s – в (5) – константу 0. Также приводятся в алгебраической форме законы поглощения

$$A \cdot B + A = A, \quad A \cdot (A + B) = A, \tag{6}$$

законы действий с константами

$$1_p + B = 1_p, \quad 1_p \cdot B = B, \quad 0_s + B = B, \quad 0_s \cdot B = 0_s \tag{7}$$

и закон склеивания

$$A + \overline{A}B = A + B. \tag{8}$$

Для этих законов также даны схемные аналоги для выполнения эквивалентных преобразований и упрощения схем. Особое внимание уделено параллельно-последовательному и последовательно-параллельному преобразованию схем с помощью первого и второго дистрибутивных законов (2).

В статье также рассмотрена методика алгебраического моделирования не параллельно-последовательных релейно-контактных схем (для которых при моделировании достаточно двух логико-алгебраических операций (1)), а так называемых мостиковых схем. Предложено преобразовывать такие схемы к параллельно-последовательной форме, отличающейся от стандартных форм этого типа лишь тем, что в различных ветвях схемы могут встречаться повторения одного и того же контакта, с последующим применением общей методики моделирования параллельно-последовательных схем. Из приведенных примеров вырисовывается еще один – прямой метод моделирования мостиковых схем, основанный на выделении всех параллельных путей между входным и выходным полюсами схемы, вычислении сопротивлений этих путей (все они последовательные, т.е. вычисления ведутся по первой формуле (1)) и последующем подсчете их произведения (в соответствии со второй формулой (1)). Столь раннее (это ведь 1936 год!) и вполне конструктивное рассмотрение А. Накашимой такого трудного научного и практического вопроса, как моделирование и расчет мостиковых схем, следует считать его важным достижением.

Еще одним важным достижением данной работы следует считать попытку его автора решить проблему моделирования динамики переключательных (релейно-контактных) схем. Уже в своей первой работе (см. п. 4) А. Накашима продемонстрировал явное понимание того факта, что моделирование статики релейно-контактных (и других переключательных) схем есть лишь часть проблем, стоящих перед разработчиками схем. Другая важная и очень трудная проблема – это моделирование динамики указанных схем. Первые робкие шаги в направлении решения этой проблемы чувствуются уже в первой работе (см. теоремы 13–16 из п. 4). Во второй же работе А. Накашима попытался алгебраизовать решение этой проблемы, подобно сделанной алгебраизации проблемы моделирования статики схем. Ему удалось придумать приемлемые обозначения элементарных динамических процессов в релейных схемах, учитывающих как логическую, так и временную составляющие работы схем. Он также хорошо разобрался в физике динамических процессов в таких схемах, где решающее значение для времени срабатывания схемы имеет соотношение моментов срабатывания различных логических элементов. Однако ему не удалось найти адекватный математический аппарат, описывающий такие соотношения (подобно тому как аппарат булевой алгебры логики адекватно описывает соотношения статических состояний отдельных элементов и всей схемы). Лишь в 1971–1972 годах такой аппарат (непрерывная логика) был найден В.И. Левиным [10, 11].

Проведенный анализ статьи [3] показывает, что в ней впервые построена схемная двоичная алгебра с базовыми операциями сложения, умножения и отрицания и несущим множеством $\{0,1\}$, которая дает возможность адекватного математического моделирования структуры и функционирования в статическом режиме параллельно-последовательных переключательных (релейно-контактных) схем. Автор статьи [3] не дает никакого названия построенной схемной алгебре, однако из ее построения и установленных для нее законов (правил эквивалентных преобразований) однозначно следует, что это булева алгебра логики. Кроме этого, в указанной статье [3] впервые в теории переключательных схем были рассмотрены не параллельно-последовательные (так называемые мостиковые) схемы и описаны два метода их логического моделирования путем эквивалентного преобразования к специальному виду параллельно-последовательных схем. Наконец, в этой статье впервые в научной литературе в развернутом виде рассмотрена проблема математического моделирования динамики переключательных схем, описана суть этой проблемы, заключающаяся в необходимости учитывать, наряду с логическими соотношениями статических состояний элементов и аналогичных состояний всей схемы, также соотношений моментов срабатывания элементов и аналогичных моментов для схемы. Также был назван некоторый частный подход к решению данной проблемы и указаны подходящие обозначения динамических процессов в схемах.

6. Анализ третьей работы А. Накашимы (декабрь 1937 г.)

Третья важная научная работа А. Накашимы «Теория двухполюсного полного сопротивления пассивных цепей в релейных схемах» (см. «Полный список оригинальных публикаций А. Накашимы на японском языке», позиция 9), как и первые 2 его работы, была подготовлена по-японски и напечатана в том же «Журнале Института инженеров электросвязи Японии» № 177, в декабре 1937 г. (теория) и № 178, в январе 1938 г. (примеры) [12]. Объем этой работы, как и предыдущей, составляет около 2,5 печатных листов. Ее сокращенная вдвое по объему англоязычная версия вышла в свет в ноябре 1938 г. в том же, что и переводы первых 2 работ, англоязычном журнале «Японская техника электросвязи», № 13, в ноябре 1938 г. [13]. В этой статье А. Накашима идет дальше двух предыдущих своих работ и строит теорию и методы логико-математического моделирования, при помощи аппарата булевой алгебры логики, структуры и функционирования переключательных (релейно-контактных) схем общего вида, т.е. не только параллельно-последовательных или мостиковых двухполюсников, но и двухполюсников и даже многополюсников с произвольно сложной конфигурацией путей между полюсами, накладывающимися друг на друга.

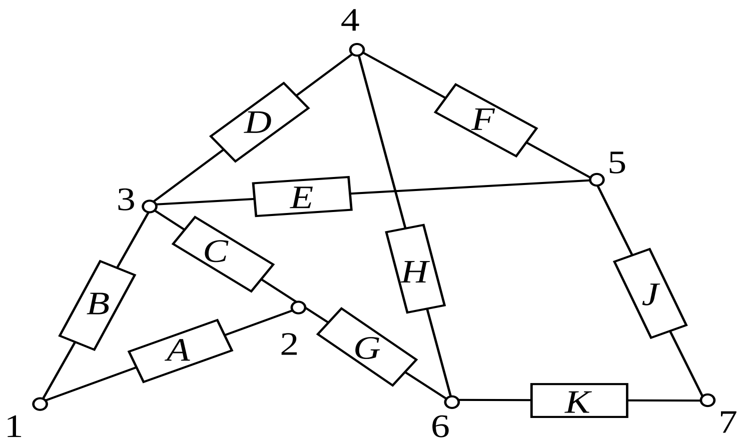

Рис. 2

В центре внимания статьи находится проблема логико-математического моделирования переключательных многополюсников с множественными, частично совпадающими на отдельных участках путями, соединяющими каждую пару полюсов. Эти пути являются либо простыми частичными путями, либо их последовательными соединениями. Изучаемый многополюсник задается в виде неориентированного графа, вершины которого соответствуют полюсам многополюсника, а ребра – простым частичным путям, соединяющим отдельные пары полюсов. Таким образом, любой возможный путь между двумя полюсами многополюсной релейно-контактной схемы на соответствующем схемном графе представляется либо ребром (которому соответствует простой частичный путь, соединяющий эти полюса) либо последовательностью ребер (которой соответствует последовательность простых частичных путей, соединяющая эти полюса). Так, на рис. 2 показан многополюсник в виде графа с вершинами (полюсами) $1, 2, \ldots, 7$ и ребрами (простыми частичными путями) $A, B, C, D, E, F, G,\ H, J, K$. Здесь буквами $A, B, \ldots, K$ обозначены как ребра (простые частичные пути), так и их сопротивления. Структура многополюсника, как обычно, моделируется логическим выражением, взаимно-однозначно соответствующим этой структуре, а функционирование многополюсника в статическом режиме – булевой логической функцией, выражающей его состояние через состояния входящих в него простых частичных путей. Для совмещения обоих видов моделирования в качестве логического выражения структуры многополюсника берется выражение булевой логической функции его состояния. Находить эту функцию предлагается по следующему простому алгоритму:

1) выбирается пара вершин, сопротивление между которыми считается состоянием многополюсника;

2) перебираются все возможные пути без повторения вершин, соединяющие выбранную пару вершин;

3) для каждого пути образуется булева сумма сопротивлений, входящих в него ребер (простых частичных путей);

4) берется произведение всех образованных сумм – это и будет булева логическая функция состояния многополюсника.

Справедливость данного алгоритма очевидна: ведь булево суммирование сопротивлений каких-либо элементов дает сопротивление последовательного пути из таких элементов, а произведение сопротивлений каких-либо путей дает сопротивление параллельного соединения этих путей (см. шаги 3, 4). В нашем случае эти пути не всегда являются параллельными, однако, как и параллельные пути, они всегда соединяют одну и ту же заданную пару вершин и потому функционально эквивалентны параллельным путям. Описанный метод нахождения функции состояния многополюсника А. Накашима назвал «законом наложения двухполюсных полных сопротивлений». Более правильно его следовало назвать «методом путей».

В статье рассмотрен пример многополюсника (графа), показанного на рис. 2. Для него по изложенному алгоритму следует:

1) выбранная пара вершин – $1,7$;

2) все возможные пути без повторения вершин, соединяющие вершины $1,7$: (A,G,K), (A,G,H,F,J), (A,G,H,D,E,J), (A,C,D,H,K), (A,C,D,F,J), (A,C,E,J), (A,C,E,F,H,K), (B,C,G,K), (B,C,G,H,F,J), (B,E,J), (B,E,F,H,K), (B,D,F,J), (B,D,H,K);

3) суммы сопротивлений входящих в пути ребер:

$$\begin{array}{lll} A+G+K; & A+C+E+J; & B+E+F+H+K; \\ A+G+H+F+J; & A+C+E+F+H+K; & B+D+F+J; \\ A+G+H+D+E+J; & B+C+G+K; & B+D+H+K; \\ A+C+D+H+K; & B+C+G+H+F+J; & \\ A+C+D+F+J; & B+E+J; & \end{array} \tag{9}$$

4) произведение всех образованных сумм, дающее булеву логическую функцию состояния многополюсника (точнее, сопротивление между его полюсами $1,7$):

$$\begin{aligned} Z = {} & (A+G+K)\cdot(A+G+H+F+J)\cdot(A+G+H+D+E+J)\cdot \\ & \cdot(A+C+D+H+K)\cdot(A+C+D+F+J)\cdot(A+C+E+J)\cdot \\ & \cdot(A+C+E+F+H+K)\cdot(B+C+G+K)\cdot(B+C+G+H+F+J)\cdot \\ & \cdot(B+E+J)\cdot(B+E+F+H+K)\cdot(B+D+F+J)\cdot(B+D+H+K). \end{aligned} \tag{10}$$

Напомним, что операции «$+$» и «$\cdot$» в формуле (10) по смыслу являются булевыми логическим операциями дизъюнкции и конъюнкции (см. п. 5). Таким образом, формула (10) выражает булеву логическую функцию состояния многополюсника в виде конъюнктивной нормальной формы булевой алгебры логики. При этом дизъюнкциям в различных скобках отвечают сопротивления различных путей, соединяющих пару вершин $(1,7)$ в схеме рис. 2 (например, дизъюнкции $A+G+K$ отвечает сопротивление пути $1 \to 2 \to 6 \to 7$ в схеме рис. 2), а заключительной конъюнкции этих дизъюнкций – полное (итоговое) сопротивление между вершинами 1 и 7 указанной схемы.

Помимо общих принципиальных вопросов, связанных с возможностью логико-математического моделирования переключательных многополюсников, в статье также изучена проблема размерности многополюсника, т.е. возможности вычисления логической функции состояния многополюсника при большом числе полюсов в нем. С этой целью сопротивление между выбранными двумя полюсами многополюсника (т.е. его логическая функция состояния) представляется в виде каскадного соединения четырехполюсников с двумя входными и двумя выходными полюсами, являющихся частями указанного многополюсника. При этом структура многополюсника декомпозируется на составляющие четырехполюсники, а искомое сопротивление многополюсника выражается через сопротивления четырехполюсников. Последовательное применение этой процедуры сводит задачу вычисления логической функции состояния многополюсника к аналогичным задачам для простых по структуре четырехполюсников, благодаря чему и разрешается проблема размерности заданного многополюсника. Описанный подход потребовал от А. Накашимы разработки теории релейно-контактных цепей в виде соединений многополюсников, аналогичной по своим задачам теории электрических цепей, что и было им сделано, причем впервые в мире.

Анализ статьи («Полный список оригинальных публикаций А. Накашимы на японском языке», позиция 9), представленный выше, устанавливает, что в ней впервые были предложены регулярные методы логико-математического моделирования релейно-контактных многополюсников произвольной структуры, в дополнение и развитие к предложенному раньше (см. [1–4]) аналогичному моделированию релейно-контактных двухполюсников параллельно-последовательного или мостикового типа. При этом, помимо разработки указанных методов, позволяющих принципиально выполнять моделирование многополюсников, в статье предложена методика решения проблемы размерности многополюсников при их моделировании, что открывает возможность анализа схем с большим числом полюсов.

7. Вклад в теорию дискретных схем

А. Накашима в течение 1930-х годов опубликовал в общей сложности 13 статей по теории переключательных (дискретных) схем – все в Японии и по-японски. Из них 10 статей были впоследствии переведены (в том числе 4 – в сокращенном виде) на английский язык и опубликованы также в японских журналах. Анализ этих публикаций А. Накашимы позволяет однозначно и определенно зафиксировать следующий его вклад в теорию переключательных схем.

Во-первых, это показанная им впервые принципиальная возможность формализованного моделирования структуры и функционирования дискретных (релейно-контактных) схем с помощью математической логики.

Во-вторых, это построенная впервые схемная двоичная алгебра с операциями сложения, умножения и отрицания на множестве $\{0,1\}$, которая и дает реально указанную возможность. Построенная алгебра, как выяснилось через несколько лет, была булевой алгеброй логики, которая, таким образом, оказалась адекватным проблеме математическим аппаратом, что и обеспечивало моделирование схем.

В-третьих, в публикациях впервые рассмотрена проблема моделирования простейших не параллельно-последовательных, так называемых мостиковых схем, и предложено ее решение путем преобразования мостиковой схемы к параллельно-последовательной форме с повторяющимися элементами (в релейно-контактной схеме – контактами).

В-четвертых, впервые предложены логические методы моделирования дискретных схем произвольной, а не только параллельно-последовательной или мостиковой структуры, причем впервые предусмотрены специально разработанные для этого методы преодоления «проклятия размерности» схемы, путем ее подходящего разложения на подсхемы.

Наконец, в-пятых, впервые ясно указано, что существующие методы формализованного моделирования дискретных схем (в частности, логические) относятся лишь к проблеме изучения статики схем. В связи с этим впервые рассмотрена проблема математического моделирования динамики схем, причем верно ухвачена суть этой проблемы – необходимость учитывать, наряду с логическими соотношениями статических состояний элементов и аналогичных состояний всей схемы, также соотношения моментов срабатывания элементов и аналогичных моментов всей схемы.

Своими открытиями А. Накашима определенно опередил своих конкурентов – как по времени их совершения, так и по их содержанию. Например, первая на Западе статья по моделированию релейно-контактных схем с помощью математической логики, написанная К.Э. Шенноном, вышла в свет только в июне 1938 г. [6], в то время как аналогичная статья А. Накашимы появилась еще в сентябре 1935 г. [1], а развивавшая ее статья [3] (в которой содержался также материал по моделированию динамики схем, отсутствовавший даже спустя много лет у Шеннона и других авторов) – в декабре 1936 г. Другой важный пример. Первая в Восточной Европе, включая СССР, серьезная статья по указанной тематике, принадлежащая В.И. Шестакову, вышла в свет лишь в марте-апреле 1941 г. [7], причем в ней отсутствовал материал по моделированию мостиковых схем, а также по моделированию динамики различных релейно-контактных схем, имевшийся в гораздо более ранних публикациях А. Накашимы [1, 3]. К сказанному необходимо добавить, что ни К.Э. Шеннон, ни В.И. Шестаков не занимались теорией многополюсных переключательных схем, которую А. Накашима разработал в значительной степени еще в декабре 1937 г. («Полный список оригинальных публикаций А. Накашимы на японском языке», позиция 9) (у Шестакова есть 4 работы по четырех- и n-полюсникам, выполненные в 1960-е – 1980-е годы, т.е. спустя 30-50 лет после Накашимы). Разумеется, у К.Э. Шеннона и В.И. Шестакова были также результаты, отсутствовавшие в более ранних публикациях А. Накашимы, например, разложимость релейно-контактной схемы по входам, вытекающая из разложимости булевой логической функции по аргументам (К.Э. Шеннон [6]), возможность моделирования обычных (не релейных) электрических схем с помощью специальной (не булевой) алгебры логики (В.И. Шестаков [7]). Отрыв А. Накашимы от других исследователей (Х. Пиш [5], В.А. Розенберг [14], А. Риттер [15], О. Плехль [16] и др.) как по времени их появления, так и по содержанию был еще большим.

8. Заключение

При жизни А. Накашима и его труды в области теории переключательных схем не были адекватно оценены и признаны ни мировым, ни хотя бы японским научным сообществом, а он сам не был удостоен каких-либо научных наград или почетных титулов – в отличие от К.Э. Шеннона, удостоившегося множества самых разных наград и титула «отца цифровой эры». Более того, даже смерть А. Накашимы в 1970 г. прошла незамеченной! А ведь открытие А. Накашимы сродни подвигу: совершенно не зная логики (в отличие от К.Э. Шеннона и В.И. Шестакова), он самостоятельно переоткрыл булеву алгебру логики как особую схемную алгебру, адекватно представляющую переключательные схемы. И все же, несмотря на эти печальные факты, жизнь замечательного ученого и организатора научных исследований отнюдь не была напрасной. Одних его работы подвигли к занятиям наукой в новой, перспективной области научных исследований, для других эти работы оказались необычайно ценны безотносительно к их тематике – просто как образец доступного, точного и ясного изложения полученных научных результатов, исходящего из имеющейся практики инженерных решений. Для Японии непреходящее значение деятельности А. Накашимы было еще и в том, что он создал японскую научную школу исследований в области переключательных схем и компьютеров. Его ученики и последователи, работавшие в Японской электротехнической лаборатории: Мочинори Гото, Ясуо Комамия, Каничи Охаши и другие, развили его логическую теорию переключательных схем и перенесли ее с комбинационных на последовательностные схемы. На основе этих теорий они разработали первые японские релейные вычислительные машины «ЭТЛ Марк 1» и «ЭТЛ Марк 2», а впоследствии и современные высокопроизводительные компьютеры [17].

И в современном международном положении Японии как второго в мире (после США) государства по уровню развития финансов, промышленности и технологий есть весомая частица труда скромного и вместе с тем выдающегося человека по имени Акира Накашима.

Приложение 1.

Полный список оригинальных публикаций Акиры Накашимы на японском языке

1. Nakashima Akira. The Theory and Practice of Relay Circuit Engineering // NEC Journal. 1934. Nov. – 1935. Sept. (серия статей).

2. Nakashima Akira. The Theory of Relay Circuit Composition // Journal of ITTE of Japan. 1935. № 150. Sept.

3. Nakashima Akira. On Reziprozitaetsgesetze // NEC Journal. 1936. Jan.

4. Nakashima Akira. Some Properties of the Group of Simple Partial Paths in the Relay Circuit // Journal of ITTE of Japan. 1936. № 155. Feb.

5. Nakashima Akira, Hanzawa Masao. The Theory of Equivalent Transformation of Simple Partial Paths in the Relay Circuit (Part 1) // Journal of ITTE of Japan. 1936. № 165. Dec.

6. Nakashima Akira, Hanzawa Masao. The theory of Equivalent Transformation of Simple Partial Paths in the Relay Circuit (Part 2) // Journal of IECE of Japan. 1937. № 167. Feb.

7. Nakashima Akira. The Theory of Four-Terminal Passive Networks in Relay Circuit // Journal of IECE of Japan. 1937. № 169. Apr.

8. Nakashima Akira. Algebraic Expressions Relative to Simple Partial Paths in the Relay Circuit // Journal of IECE of Japan. 1937. № 173. Aug.

9. Nakashima Akira. The Theory of Two-Point Impedance of Passive Networks in the Relay Circuit (Part 1) // Journal of IECE of Japan. 1937. № 177. Dec.

10. Nakashima Akira. The Theory of Two-Point Impedance of Passive Networks in the Relay Circuit (Part 2) // Journal of IECE of Japan. 1938. № 178. Jan.

11. Nakashima Akira. The Transfer Impedance of Four-Terminal Passive Networks in the Relay Circuit // Journal of IECE of Japan. 1938. № 179. Feb.

12. Nakashima Akira, Hanzawa Masao. Expansion Theorem and Design of Two-Terminal Relay Networks (Part 1) // Journal of IECE of Japan. 1940. № 206. May.

13. Nakashima Akira, Hanzawa Masao. Expansion Theorem and Design of Two-Terminal Relay Networks (Part 2) // Journal of IECE of Japan. 1940. № 209. Aug.

Принятые сокращения:

NEC – Nippon Electrical Company;

ITTE – the Institute of Telegraph and Telephone Engineers;

IECE – the Institute of Electrical Communication Engineers.

Приложение 2.

**Полный список переводов оригинальных публикаций
Акиры Накашимы на английский язык**

14. Nakashima Akira. The Theory of Relay Circuit Composition // NECE. 1936. № 3. May.

15. Nakashima Akira. Some Properties of the Group of Simple Partial Paths in the Relay Circuit // NECE. 1937. Mar.

16. Nakashima Akira, Hanzawa Masao. The Theory of Equivalent Transformation of Simple Partial Paths in the Relay Circuit (Parts 1, 2) // NECE. 1938. № 9. Feb (значительно сокращенный перевод).

17. Nakashima Akira. The Theory of Four-Terminal Passive Networks in Relay Circuit // NECE. 1938. Apr (опубликована только аннотация).

18. Nakashima Akira. Algebraic Expressions Relative to Simple Partial Paths in the Relay Circuit // NECE. 1938. Sept.

19. Nakashima Akira. The Theory of Two-Point Impedance of Passive Networks in the Relay Circuit (Parts 1, 2) // NECE. 1938. № 13. Nov (значительно сокращенный перевод).

20. Nakashima Akira. The Transfer Impedance of Four-Terminal Passive Networks in the Relay Circuit // NECE. 1938. Dec.

21. Nakashima Akira, Hanzawa Masao. Expansion Theorem and Design of Two-Terminal Relay Networks (Part 1) // NECE. 1941. Apr.

22. Nakashima Akira, Hanzawa Masao. Expansion Theorem and Design of Two-Terminal Relay Networks (Part 2) // NECE. 1941. Okt.

Принятое сокращение:

NECE – Journal «Nippon Electrical Communication Engineers».

Литература

1. Nakashima A. The Theory of Relay Circuits Composition // Journal of the Institute of Telegraph and Telephone Engineers of Japan. 1935. № 150.

2. Nakashima A. The Theory of Relay Circuits Composition // Nippon Electrical Communication Engineers. 1936. № 3.

3. Nakashima A., Hanzawa M. The Theory of Equivalent Transformation of Simple Partial Paths of Relay Circuits. Parts 1, 2 // Journal of the Institute of Telegraph and Telephone Engineers of Japan. 1936. № 165, Journal of the Institute of Electrical Communication Engineers of Japan. 1937. № 167.

4. Nakashima A., Hanzawa M. The Theory of Equivalent Transformation of Simple Partial Paths of Relay Circuits // Nippon Electrical Communication Engineers. 1938. № 9.

5. Piesch H. Begriff der allgemainen Schaltungstechnik // Archiv für Elektrotechnik. 1939. B. 33. № 10, № 11.

6. Shannon C. E. A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits // Trans. of the American Institute of Electrical Engineers. 1938. Vol. 57.

7. Шестаков В. И. Алгебра двухполюсных схем, построенных исключительно из двухполюсников (алгебра А-схем) // Автоматика и телемеханика. 1941. № 2.

8. Shannon C. E. The Synthesis of Two-Terminal Switching Circuits // Bell Systems Technical Journal. 1949. Vol. 28. № 1.

9. Яновская С.А. Основания математики и математическая логика // Математика в СССР за 30 лет (1917–1947). Т. 2. М.–Л. 1948.

10. Левин В. И. Анализ надежности асинхронных устройств // Пути повышения надежности промышленных АСУ. Часть 1. Тезисы докладов республиканского семинара. – Киев: Изд-во Укр. республик. правления НТО Приборпром, 1971.

11. Левин В. И. Бесконечнозначная логика и переходные процессы в конечных автоматах // Автоматика и вычислительная техника. 1972. № 6.

12. Nakashima A. The Theory of Two-Point Impedance of Passive Networks in the Relay Circuits // Journal of the Institute of Electrical Communication Engineers of Japan. 1937. № 177, 1938. № 178 (япон. оригинал).

13. Nakashima A. The Theory of Two-Point Impedance of Passive Networks in the Relay Circuits // Nippon Electr. Commun. Eng. 1938. № 13.

14. Розенберг В. А. Задача о блокировке и преобразование контактных групп // Автоматика и телемеханика. 1940. № 1.

15. Ritter A. Beitrage zur Schaltlehre. Dissertation. Wien. 1938.

16. Plechl O. Die Kombinatorik der strompfade elektrotechnischer Schaltungen. Dissertation. Wien. 1943.

17. Yamada A. History of Research on Switching Theory in Japan // IEEJ Trans. FM. 2004. Vol. 24. № 8.

18. Левин В. И. Акира Накашима и логическое моделирование дискретных схем // Логические исследования. 2007. № 14.

19. Левин В. И. Акира Накашима и его вклад в науку и технику дискретных схем // Датчики и системы. 2008. № 2.

References

1. Nakashima A. The Theory of Relay Circuits Composition. *Journal of the Institute of Telegraph and Telephone Engineers of Japan*, 1935, no. 150 (Sept) (Japanese original).

2. Nakashima A. The Theory of Relay Circuits Composition. *Nippon Electrical Communication Engineers*, 1936, no. 3 (May) (short translation of [1] in English).

3. Nakashima A., Hanzawa M. The Theory of Equivalent Transformation of Simple Partial Paths of Relay Circuits. Parts 1, 2. *Journal of the Institute of Telegraph and Telephone Engineers of Japan*, 1936, no. 165 (Dec), *Journal of the Institute of Electrical Communication Engineers of Japan*, 1937, no. 167 (Feb) (Jap. original).

4. Nakashima A., Hanzawa M. The Theory of Equivalent Transformation of Simple Partial Paths of Relay Circuits. *Nippon Electrical Communication Engineers*, 1938, no. 9 (Feb) (strongly shortened translation of article [3] in English).

5. Piesch H. Begriff der allgemainen Schaltungstechnik. *Archiv für Elektrotechnik*, 1939, B. 33, no. 10 (Okt), no. 11 (Nov).

6. Shannon C. E. A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits. *Trans. of the American Institute of Electrical Engineers*, 1938, vol. 57 (June).

7. Shestakov V. I. *Algebra dvuhpolyusnyh skhem, postroennyh isklyuchitelno iz dvuhpolyusnikov (algebra A-skhem)* [Algebra of Two-Pole Schemes Which Consist of Two-Poles Only]. *Avtomatika i telemehanika*, 1941, no. 2 (Apr).

8. Shannon C. E. The Synthesis of Two-Terminal Switching Circuits. *Bell Systems Technical Journal*, 1949, vol. 28, no. 1.

9. Yanovskaya S. A. Osnovaniya matematiki i matematicheskaya logika [Bases of Mathematics and Mathematical Logic]. *Matematika v SSSR za 30 let (1917–1947)*, 1948. vol. 2.

10. Levin V. I. Analiz nadezhnosti asinhronnyh ustroystv [Analysis of Reliability of Asynchrone Devices]. *Puti povyhsheniya nadezhnosti promyshlennyh ASU. Part 1. Tezisy dokladov respublikanskogo seminara*. Kiev, NTO Priborprom, 1971.

11. Levin V. I. Beskonechnoznachnaya logika i perehodnye processy v konechnyh avtomatah [Infinity-Valued Logic and Transients in Finite Automata]. *Avtomatika i vychislitelnaya tehnika*, 1972, № 6.

12 Nakashima A. The Theory of Two-Point Impedance of Passive Networks in the Relay Circuits. *Journal of the Institute of Electrical Communication Engineers of Japan*, 1937, no. 177 (Dec), 1938, no. 178 (Jan) (Japanese original).

13. Nakashima A. The Theory of Two-Point Impedance of Passive Networks in the Relay Circuits. *Nippon Electr. Commun. Eng*, 1938, no. 13 (Nov) (strongly shortened translation of article [7] in English).

14. Rozenberg V. A. Zadacha o blokirovke i preobrazovanie kontaktnyh grupp [Problem of Lock and Transformation of Contact Groups]. *Avtomatika i telemekhanika*. 1940. № 1.

15. Ritter A. *Beitrage zur Schaltlehre. Dissertation*. Wien. 1938.

16. Plechl O. *Die Kombinatorik der strompfade elektrotechnischer Schaltungen. Dissertation*. Wien. 1943.

17. Yamada A. History of Research on Switching Theory in Japan. *IEEJ Trans. FM*, 2004, vol. 24, no. 8.

18. Levin V. I. Akira Nakashima i logicheskoe modelirovanie diskretnyh skhem [Akira Nakashima and Logical Modeling of Discrete Schemes]. Logicheskie issledovaniya, 2007, no. 14.

19. Levin V. I. *Akira Nakashima i ego vklad v nauku i tehniku diskretnyh skhem* [Akira Nakashima and His Contribution to Science and Engineering of Discrete Schemes]. *Datchiki i sistemy*, 2008, № 2.

Статья поступила: 6 декабря 2018 г.

Информация об авторе

Левин Виталий Ильич – доктор технических наук, профессор, PhD, Full Professor. Заслуженный деятель науки РФ. Пензенский государственный технологический университет. Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике, социологии, истории; принятие решений; оптимизация; теория автоматов; теория надежности; распознавание; история науки; проблемы образования. E-mail: vilevin@mail.ru

Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

UDC 519.711

Akira Nakashima and 80th Anniversary of Discovery of Logical Theory of Discrete Computing and Control Devices

V. I. Levin

Relevance. In 2018, 80 years have passed since the discovery of the logical theory of discrete computing and control devices. This discovery, made by three outstanding scientists – A. Nakashima (Japan), K.E. Shannon (USA) and V.I. Shestakov (USSR), was of great importance for the whole of science. It opened the way for a new scientific discipline – cybernetics, making its theoretical base. Therefore, the development of the fundamental results of these discoverers remains an urgent task. **The purpose** of the article is to provide a detailed review of the version of the logical theory of discrete devices proposed by A. Nakashima, including the history of its discovery, methodology, results and applications in various fields of science and technology. **Method.** To achieve this goal such methods are used: 1) study of the works of the scientist from primary sources and the scientific and historical literature, 2) study of the biography of the scientist according to the memoirs of contemporaries and scientific and biographical literature, 3) comparison of the works of the scientist with the works of other scientists in this field. **Result.** It was established that A. Nakashima was the first to demonstrate the possibility of mathematical modeling of discrete computing and control devices using Boolean algebra of logic. This made it possible to develop formalized methods for analyzing, synthesizing and designing such devices, allowing to create devices of great complexity. In addition, the scientist first formulated the problem of mathematical modeling of the dynamics of discrete devices, the solution to which the researchers approached only 30 years later. **Novelty.** It is established that Nakashima is the author of the discovery, according to which the Boolean algebra of logic is an adequate mathematical apparatus for representing schemes of discrete devices. This discovery was published in September 1935. It allowed further development of constructive methods for analyzing, synthesizing and designing circuits for discrete computing and control devices. The scientist also first proposed a method for studying non-parallel-serial (i.e. bridge) circuits, a method for decomposing complex circuits into subcircuits to overcome the "curse of dimension" and the formulation of the problem of mathematical modeling of circuit dynamics.

Keywords: *logical theory, discrete devices, Boolean algebra.*

Information about Author

Vitaly Ilich Levin – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Honoured Scientist of Russia. Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economics, sociology, history; decision making, optimization, recognition, automata theory, reliability theory, history of science, problems of education. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova / Gagarin st., 1a/11.