УДК 510.6

Логическое моделирование динамики дискретных схем: к 50-летию открытия

Левин В. И.

Актуальность. *В 2022 году исполнилось 50 лет важному событию в истории кибернетики – открытию адекватного математического аппарата для изучения динамики дискретных систем. В связи с этим полезно осмыслить сделанное тогда, оценить влияние сделанного на науку и общество.* ***Цель статьи*** *– на примере полученных в этой области результатов сформировать у начинающих ученых понимание фундаментальных процессов эволюционного и революционного подходов к формированию новых научных знаний, закономерностей развития науки.* ***Результат:*** *Для достижения целей статьи использованы отечественная литература по Кибернетике и по истории науки, труды самого автора, воспоминания его коллег. В статье изложен смысл научных результатов автора, возможности их использования в технике и других областях. Воссоздана научная биография автора в рассматриваемый период. Использованы воспоминания его коллег и знакомых.* ***Новизна и теоретическая значимость.*** *В статье впервые воссоздана история творческой деятельности отечественных и зарубежных ученых, приведшей к открытию адекватного математического аппарата для изучения динамики дискретных систем. Работа будет полезна молодым ученым, изучающим методологию научных исследований, а также специалистам, работающим над сложными научными проблемами как пример их успешного разрешения.*

Ключевые слова: *дискретные системы, динамика систем, логическое моделирование.*

Введение

Наука логика, созданная в IV в. до н.э. стараниями великого древнегреческого ученого Аристотеля, много веков оставалась логикой мышления и служила только в качестве средства для построения правильного мышления. Однако в XX в., после работ группы выдающихся ученых разных стран – японца А. Накашимы, американца К.Э. Шеннона, русского В.И. Шестакова, австрийца О. Плехля, немки Х. Пиш и других – выяснилось, что логика позволяет также моделировать поведение множества разнообразных систем, в основном, технических. Эта новая ситуация подтолкнула создание компьютеров и способствовала рождению ряда новых наук – кибернетики, искусственного интеллекта, компьютерных наук и др. Резко ускорился технический прогресс общества.

Более внимательный анализ работ, перечисленных ученых, показывает, что реальное содержание их теорий – возможность установления, с помощью операций булевой алгебры логики, зависимости двоичного состояния дискретной схемы от двоичных же состояний элементов этой схемы в один и тот же, произвольный момент времени. Так что указанные ученые реально открыли лишь логико-алгебраическую модель статики работы дискретных схем (более точно –

Библиографическая ссылка на статью:
Левин В. И. Логическое моделирование динамики дискретных схем: к 50-летию открытия // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 368-384. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-368-384
Reference for citation:
Levin V. I. Logical modeling of the dynamics of discrete circuits: to the 50th anniversary of the discovery. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 4, pp. 368-384 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-368-384

релейно-контактных схем). Что касается динамики работы таких схем, то они ею никогда не занимались. Между тем, изучение динамических процессов дискретных схем имеет очень большое, а в ряде задач - решающее практическое значение.

Действительно, хорошо известно, что основные характеристики любой технически реализованной дискретной схемы – устойчивость, быстродействие, надежность и др. – формируются именно в динамическом (переходном) процессе, сопровождающем переход схемы из одного статического состояния в другое [1]. С другой стороны, если дискретная схема не подлежит реализации, а представляет собой только удобную математическую модель для описания поведения некоторой системы (эволюция надежности технической системы [2], поведение социальной группы [3] и т.д.), то интерес представляет только динамический процесс в схеме. Поэтому с конца 1940-х – начала 1950-х гг. началось интенсивное изучение проблемы адекватного описания динамики дискретных систем. Лидирующее положение здесь заняли ученые из стран Восточной и Центральной Европы: СССР, Румынии, ГДР, Чехословакии и др.

1. Постановка проблемы

Проблема количественного изучения динамического поведения дискретных схем может быть поставлена таким образом. Пусть нам известна булева логическая функция $y = f(x_1,...,x_n)$, описывающая зависимость состояния выхода дискретной схемы y от состояний $x_1,...,x_n$ ее входов в один и тот же произвольный момент непрерывного времени t, где $x_1,...,x_n, y \in \{0,1\}$. При этом двоичные состояния входов и выхода схемы могут иметь самую раз личную интерпретацию, в зависимости от типа и назначения рассматриваемой нами схемы. Например, $x_i = 1\,(y = 1)$ может означать проводимость контакта реле (проводимость схемы), а $x_i = 0\,(y = 0)$ – их непроводимость в релейно-контактной схеме. Те же значения переменных могут означать работоспособные состояния элементов $(x_i = 1)$ и схемы из этих элементов $(y = 1)$ или их неработоспособные состояния $(x_i = 0,\, y = 0)$, если эта схема является моделью надежности некоторой системы. Или $x_i = 1$ и $x_i = 0$ могут обозначать единичные и нулевые значения сигнала на различных i-х входах функциональной схемы с реализуемой на выходе y булевой логической функцией входов $y = f(x_1,\ldots,x_n)$, так что $y = 1$ и $y = 0$ обозначают единичные и нулевые значения сигнала на выходе схемы и т.д. Пусть известны процессы $x_1(t),\ldots,x_n(t)$, описывающие изменение состояний входов дискретной схемы во времени. Нужно найти процесс $y(t)$, описывающий изменение состояния выхода схемы во времени, в виде аналитически выраженной суперпозиции процессов $x_i(t),\, i = \overline{1,n}$, описывающих изменение состояний входов.

Процесс последовательного изменения состояния любого входа схемы состоит из начального состояния a и последовательности моментов α изменения состояний 2 видов: $1'_\alpha =$ изменение $0 \to 1$ в момент α; $0'_\alpha =$ изменение $1 \to 0$ в момент α. Аналогично можно представить процесс последовательного изменения состояния выхода схемы с указанными входами.

Таким образом, проблему количественного изучения динамики дискретных схем можно представить структурно в следующем виде. По заданной логической функции $y = f(x_1, \dots, x_n)$, описывающей зависимость состояния выхода дискретной схемы y от состояний $x_1, ..., x_n$ ее входов в один и тот же произвольный момент времени t, и известным моментам последовательного изменения состояний этих входов a_i : $\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, ..., \alpha_{im_i}$, $i = \overline{1, n}$ нужно выразить моменты последовательного изменения состояния выхода схемы в виде аналитически выраженной суперпозиции моментов $\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, ..., \alpha_{im_i}$, $i = \overline{1, n}$.

Заметим, что именно возможность аналитического решения поставленной проблемы в виде указанной суперпозиции моментов изменения состояний входов дискретной схемы позволяет говорить, что использованный для его получения математический аппарат с некоторым конечным набором операций является адекватным этой проблеме.

Сложность решения поставленной проблемы заключается в следующем. Во-первых, априори совершенно неясна номенклатура операций, с помощью которой можно всегда осуществить вышеуказанную суперпозицию, причем так, чтобы она (номенклатура) была не только достаточной, но и необходимой для выполнения суперпозиции. Во-вторых, для решения проблемы никак нельзя использовать не только операции булевой (двузначной) алгебры логики (которые были успешно использованы для моделирования статики многих систем), но и операции многозначной и даже бесконечнозначной логики, т.е. любой дискретной логики, так как изменения состояний входов и выхода любой схемы с дискретными состояниями в общем случае могут происходить в произвольные моменты непрерывного времени. В-третьих, в силу сказанного во втором пункте, при решении данной проблемы невозможно воспользоваться подходами, наработанными ранее в практике применения логики в науке и технике, основанными на предположении о дискретности времени и необходимо искать какие-то другие подходы.

Исследования в области моделирования динамики дискретных систем начали проводиться с конца 1940-х – начала 1950-х годов. Ученые тогда с трудом понимали, какой именно математический аппарат мог бы составить твердую теоретическую основу для решения стоящей перед ними проблемы. Однако многим, вероятно, было уже понятно, что математическая логика в ее традиционной дискретной форме двузначной (булевой) или многозначной алгебры логики едва ли годится на эту роль. Поэтому первый этап работ в рассматриваемой области, который охватывает 1950-е – 1960-е гг., характеризуется использованием самого разнообразного, чаще известного, а иногда и вновь созданного математического аппарата.

При этом адекватность используемого аппарата проблеме моделирования динамики дискретных систем обычно не обсуждалась, а главное внимание уделялось вычислительной стороне дела. Подробный обзор работ этого этапа приведен в книге автора «Очерки истории прикладной логики» (Пенза: Изд-во ПГТА, 2007), к которой мы и отсылаем читателя.

2. Открытие логического моделирования динамики дискретных систем

Открытие логико-алгебраического исчисления, могущего служить адекватным математическим аппаратом для количественного изучения динамики дискретных систем, произошло быстро и неожиданно. Весной 1971 г. автор этих строк, тогда научный сотрудник Института электроники и вычислительной техники АН Латвии в Риге, окончив написание докторской диссертации по вероятностным методам изучения надежности конечных автоматов, стал подыскивать темы для новых исследований. В это время ему под руки попала любопытная книга директора этого института Э.А. Якубайтиса по асинхронным логическим автоматам [4]. Просматривая книгу, он с удивлением обнаружил, что сложные логико-динамические процессы в асинхронных автоматах автор книги пытается изучать количественно без помощи какого бы то ни было математического аппарата – просто так, «на пальцах». В связи с этим возникал вопрос: а верно ли просчитаны многочисленные примеры, на которых и была, по существу, построена вся книга? Чтобы ответить на этот вопрос, надо было повторить все расчеты, но уже не «на пальцах», а с помощью подходящего математического аппарата. И тут автору снова повезло: абсолютно случайно он наткнулся на небольшую книжку С.А. Гинзбурга, посвященную проблеме аппроксимации функций многих переменных применительно к построению аналоговых вычислительных устройств [5]. Тематика книги была далека от его научных интересов, но использованный в ней необычный математический аппарат – непрерывная логика – заинтриговал его. Он быстро понял, что нашел подходящую базу для построения адекватного математического аппарата, решающего проблему количественного изучения динамики дискретных схем в общем, аналитическом виде. В марте 1971 г. были сделаны первая публикация и доклад на конференцию [6], содержащие идею нового подхода. К концу 1971 г. была подготовлена серия полнометражных статей с изложением основных результатов, которые были опубликованы в течение 1972–74 годов в отечественных и зарубежных журналах [7–13]. А в 1975 г. вышли первые две монографии, содержавшие решение проблемы количественного изучения динамики дискретных схем, данное на языке алгебры непрерывной логики [14, 15].

Это было открытие возможности выражать моменты последовательного изменения состояний выхода дискретной схемы через моменты последовательного изменения состояний ее входов в аналитической форме с помощью суперпозиции операций непрерывной логики – дизъюнкции (взятие $\max$) и конъюнкции (взятие $\min$). Оно установило возможность логического моделирования (в терминах непрерывной логики) динамики дискретных схем, подобно тому, как работы А. Накашимы, К.Э. Шеннона и В.И. Шестакова 1930-х годов установили возможность логического (в терминах булевой логики) моделирования статики этих схем. Так было положено начало разработке динамической теории дискретных схем на строгой и адекватной логико-математической основе. Причем в монографии [13] возможности новой теории демонстрировались не только в общем виде, но и на многочисленных примерах расчета схем, в том числе, заимствованных из [4] и других источников. При этом впервые выяснилось, что целый ряд рассмотренных ранее примеров динамического поведения дискретных схем проанализированы ошибочно, что, в свою очередь, привело к неверным выводам.

Предложенная идея использования непрерывной логики для количественного изучения динамики дискретных схем достаточно проста. Пусть имеется простейшая схема (логический элемент) с двумя входами x_1, x_2 и одним выходом y, реализующая на выходе булеву логическую функцию «конъюнкция» $y = x_1 \wedge x_2$. Пусть, кроме того, заданы изменения состояний входов схемы $x_1(t) = 0 \to 1|_{t=a} \equiv 1'_a$, $x_2(t) = 0 \to 1|_{t=b} \equiv 1'_b$. Тогда соответствующее изменение состояния выхода (динамический процесс на выходе) схемы, с учетом того, что состояние 1 на выходе схемы с указанной функцией наступает в момент наступления состояния 1 на обоих ее входах (т.е. в более поздний из двух моментов наступления этого состояния на входах), имеет вид $y(t) = 0 \to 1|_{t=\max(a,b)} = 1'_{a \vee b}$, где $a \vee b$ означает дизъюнкцию непрерывной логики моментов a и b. В результате получаем такую формулу для динамического процесса на выходе двухвходовой схемы – «конъюнктора» при входных изменениях в виде скачков $0 \to 1$ в моменты a и b

$$1'_a \wedge 1'_b = 1'_{a \vee b}. \tag{1}$$

Совершенно аналогично находим соответствующие формулы для динамических процессов на выходе конъюнктора и дизъюнктора – дискретной схемы, реализующей на выходе булеву логическую функцию «конъюнкция» y= x_1 x_2 и «дизъюнкция» $y = x_1 \vee x_2$ – при других возможных входных изменениях, одинаковых для всех входов:

$$1'_a \wedge 1'_b = 1'_{a \vee b};\; 0'_a \wedge 0'_b = 0'_{a \wedge b};\; 1'_a \vee 1'_b = 1'_{a \wedge b};\; 0'_a \vee 0'_b = 0'_{a \vee b}. \tag{2}$$

В формуле (2) $1'_d$ означает изменение сигнала $0 \to 1|_{t=d}$, $0'_d$ – изменение сигнала $1 \to 0|_{t=d}$, операция $a \vee b = \max(a,b)$ – дизъюнкция непрерывной логики, $a \wedge b = \min(a,b)$ – конъюнкция непрерывной логики. Таким образом, при однократных изменениях состояний входов, одинаковых для различных входов, динамический процесс на выходе конъюнктора и дизъюнктора всегда можно выразить в терминах операций дизъюнкции и конъюнкции непрерывной логики, совершаемых над моментами входных изменений сигнала.

В более сложном случае, при однократных изменениях состояний входов, неодинаковых для различных входов, применяется перебор различных возможных вариантов взаимного расположения моментов входных изменений, запись динамического процесса на выходе схемы для каждого варианта и последующее их объединение в общее выражение динамического процесса с помощью операций непрерывной логики. Изложенный метод всегда приводит к успеху [15]. Пусть, например, нам необходимо найти динамический процесс на выходе конъюнктора при входных изменениях $x_1(t) = 1'_a, x_2(t) = 0'_b$. Очевидно, что этот процесс равен одиночному импульсу $1(a,b)$ в интервале (a,b) или тождественному нулю, в зависимости от того, что больше: b или a. Тогда, интерпретируя тождественный нуль как одиночный импульс с совмещенным началом и концом, можем записать искомый процесс в виде

$$1'_a \wedge 0'_b = \begin{cases} 1(a,b), b > a, \\ 1(a,a), b \le a. \end{cases}$$

Совмещая оба записанных выражения в одно с помощью операции дизъюнкции непрерывной логики $\vee$, окончательно находим единое выражение искомого динамического процесса

$$1'_a \wedge 0'_b = 1(a, a \vee b)\,. \tag{3}$$

Аналогично находим выражение динамического процесса на выходе дизъюнктора при тех же входных изменениях – он имеет вид одиночной паузы $0(\cdot)$ в указанном в скобке интервале

$$1'_a \vee 0'_b = 0(b, a \vee b)\,. \tag{4}$$

В еще более сложном случае, при многократных изменениях состояний входов, применяется декомпозиция одного из двух входных процессов $x_1(t)$ и $x_2(t)$, например, $x_1(t)$, на два подпроцесса $x_1^1(t)$ и $x_1^2(t)$, которые стыкуются в точке изменения процесса $x_1(t)$ (эта точка имеет вид $1'_a$ или $0'_b$). Затем находятся части искомого динамического процесса на выходе схемы $y(t)$ в виде реакций $y^1(t)$ и $y^2(t)$ на получившиеся в результате декомпозиции частичные входные воздействия $\{x_1^1(t), x_2(t)\}$ и $\{x_1^2(t), x_2(t)\}$. Весь искомый динамический процесс $y(t)$ находится как последовательность его найденных частей $y^1(t), y^2(t)$. Метод декомпозиции сводит задачу нахождения динамического процесса на выходе конъюнктора и дизъюнктора с заданными входными процессами к аналогичной задаче, однако при более простых (с меньшим числом изменений) входных процессах. Поэтому последовательное применение этого метода в конечном итоге приводит к задаче нахождения динамического процесса на выходе конъюнктора и дизъюнктора с простыми, однократными изменениями состояний входов, которая, как уже было сказано выше, всегда имеет решение в терминах операций непрерывной логики: дизъюнкция и конъюнкция. Этот прием приводит к успеху во всех случаях, кроме ситуаций [15]:

1) количества изменений состояний входов заданы в численной форме, но велики;

2) количества изменений состояний входов заданы в буквенной форме.

Известно, что наборы булевых логических функций (конъюнкция, отрицание) и (дизъюнкция, отрицание) функционально полны, т.е. позволяют с помощью их суперпозиции реализовать любую булеву логическую функцию. Известно также, что динамический процесс на выходе инвертора, реализующего на выходе логическое отрицание его входа, при входном процессе с любым числом изменений состояния, выражается весьма просто в аналитической форме через входной процесс следующим образом: все импульсы (паузы) входного процесса заменяются на паузы (импульсы) в тех же временных интервалах. Таким образом, нахождение динамического процесса на выходе инвертора не требует использования никаких логических операций. В сочетании с тем, что было сказано раньше, это означает, что динамический процесс на выходе всякой дискретной схемы с любым конечным числом входов, любой реализуемой на выходе булевой логической функцией от значений входов и любой конечной сложностью (числом изменений) входных процессов может быть выражен в аналитической форме через моменты входных изменений с помощью операций непрерывной логики – дизъюнкции и конъюнкции. В этом и состоит суть открытия, произошедшего в начале 1970-х годов.

Созданная еще в начале 1970-х гг. на основе совершенного открытия непрерывно-логическая теория динамических процессов в дискретных схемах [7–15] была впоследствии значительно дополнена и расширена. Прежде всего, были существенно развиты теория и методы изучения динамических процессов в дискретных схемах с памятью (с контурами обратной связи). Любая схема с памятью содержит обычную (без памяти) дискретную подсхему и блок памяти из параллельно работающих элементов памяти, причем часть выходов подсхемы подается на входы блока памяти, а выходы блока памяти – на входы подсхемы, что создает контуры обратной связи. Такая структура дискретных схем с памятью позволяет изучать динамические процессы в них путем приспособления методов, разработанных для изучения схем без памяти, т.е. в этом случае не надо совершать никакого открытия. Поэтому первые работы по количественному изучению в аналитической форме динамики дискретных схем с памятью были сделаны сразу после первых работ по аналогичному изучению схем без памяти [10, 11]. Во второй половине 1970-х – 1980-е гг. продвижение в изучении динамики схем с памятью было особенно заметным [16–18]. Далее, в 1975 г. были открыты так называемые логические определители [19]. Это открытие революционизировало теорию динамических процессов в дискретных схемах, позволив изучать в аналитической форме динамику схем любой сложности, при произвольно сложных (с любым числом изменений) входных процессах [17, 18, 20]. Существенно, что после этого оказалось возможным работать со схемами и их входными процессами, сложность которых может быть произвольной величиной, заданной как численно, так и буквенно. Важная роль логических определителей в динамике дискретных схем подобна роли обычных определителей и матриц в теории линейных систем, однако в нашем случае изучаемый объект (дискретная схема) является нелинейным, т.е. более сложным. С помощью аппарата логических определителей были получены замкнутые аналитические выражения для динамических процессов ряда классов дискретных схем, при произвольной буквенно заданной сложности как самих схем, так и их входных процессов [21–25]. Речь здесь идет о пороговых схемах, схемах с симметрическими реализуемыми функциями, типовых логических элементах, а также схемах с некоторыми типовыми входными процессами, например, периодическими. Наконец, отметим важные исследования по разработке методов расчета динамических процессов в дискретных схемах в условиях различных форм неопределенности временных параметров входных процессов и внутрисхемных задержек. Эти методы – недетерминистско-логический, метод огибающих, метод эквивалентных схем, вероятностный анализ, приближенный метод и другие – позволили сводить расчет динамических процессов в дискретных схемах в условиях неопределенности к аналогичному расчету в условиях полной определенности, который можно производить с помощью аппарата непрерывной логики [26–32]. Важное значение имели также работы по получению приближенных оценок динамических процессов в дискретных схемах, позволивших снизить сложность расчета указанных процессов за счет уменьшения в некоторой степени его точности [33].

Наиболее полное изложение непрерывно-логической теории динамических процессов в дискретных схемах дано в итоговой монографии В.И. Левина [34].

3. Применения логического моделирования динамики дискретных схем

Логическое моделирование динамики дискретных схем нашло многочисленные применения [35]. Во-первых, это применения, связанные с изучением динамики и, в частности, переходных процессов в различных вычислительных и управляющих устройствах, имеющие целью обеспечить требуемое качество, надежность, быстродействие и некоторые другие параметры этих устройств [18, 36, 37]. Во-вторых, это применения, связанные с созданием логической теории надежности, в которой некоторая дискретная схема служит математической моделью надежности исследуемой технической системы, причем входные процессы схемы моделируют потоки отказов в элементах системы, выходной динамический процесс схемы – аналогичный поток отказов в системе в целом, а логическая функция, реализуемая схемой, – соотношения между теми и другими. Это и позволяет применить непрерывно-логическую теорию динамических процессов в дискретных схемах для изучения надежности систем [2].

Весьма важным применением логической теории динамических процессов в дискретных схемах явилось создание динамической диагностики таких схем, которая основана на изменении вида динамического процесса на выходе схемы при появлении в ней тех или иных неисправностей, что и позволяет обнаружить неисправности схемы путем анализа изменения динамического процесса на ее выходе [3, 38, 39]. Важным преимуществом динамической диагностики дискретных схем по сравнению с традиционной статической диагностикой явилась ее большая обнаруживающая способность, что связано с большей информацией о схеме, содержащейся в ее выходном динамическом процессе. Еще одним важным применением теории стали задачи распознавания образов и анализа пространственных сцен [18, 40]. В данном случае, аналогично применению этой теории в области надежности, дискретная схема служит лишь математической моделью процесса распознавания, точнее – моделью вычисляемой при этом функции совпадения образа и эталона, причем процессы на входах схемы-модели моделируют степени совпадения отдельных элементов сравниваемых образа и эталона, а динамический процесс на ее выходе – степень их совпадения в целом, на основании которой и принимается решение о принадлежности образа определенному классу, представленному данным эталоном. Интересной областью применения динамики дискретных схем явилась теория синхронизации динамических систем, в которой требуется определить временные интервалы, в которых несколько имеющихся процессов находятся в одинаковом фазовом состоянии, благодаря чему могут быть подключены к одному приемнику [35]. Применение в данной задаче, подобно предыдущей, модели в виде некоторой дискретной схемы, «измеряющей» на выходе степень совпадения фаз входных процессов, позволяет проводить простые и эффективные расчеты синхронизации динамических систем путем вычисления динамического процесса на выходе дискретной схемы-модели, на входах которой действуют синхронизируемые процессы. Теорию динамических процессов в дискретных схемах можно также успешно применять для расчета регулярных систем обслуживания, которые отличаются от хорошо известных вероятностных систем обслуживания детерминированным режимом поступления заявок и их обслуживания [3, 35]. В этом случае моделью системы выступает дискретная схема с несколькими входами, процессы в которых моделируют последовательности интервалов поступления заявок от нескольких источников, несколькими входами, процессы в которых моделируют последовательности интервалов возможного обслуживания заявок несколькими приборами, и несколькими выходами, динамические процессы в которых моделируют последовательности интервалов реального обслуживания заявок приборами, получающихся при пересечении интервалов поступления заявок с интервалами их возможного обслуживания. Еще одной областью эффективного применения логического аппарата моделирования динамики дискретных схем явилась дискретная оптимизация [41, 42]. Наконец, отметим еще возможность эффективного применения методов динамики дискретных схем в качестве математического аппарата для количественного изучения социальных, экономических и исторических процессов, включая изучение библейской истории [3, 43-45].

В заключении раздела отметим монографии [47-55], где более подробно рассматриваются различные применения логического моделирования динамики дискретных схем.

4. Заключение

Работы по логическому моделированию динамики дискретных схем и основанная на них непрерывно-логическая теория динамических процессов в дискретных схемах, в отличие от известных работ по логическому моделированию статики таких схем (А. Накашима, К. Шеннон, В.И. Шестаков и др.), родились целиком на отечественной почве и обеспечили России бесспорный приоритет в этой области. Они получили широкую известность и признание [46]; на них имеются сотни ссылок в различных странах.

Вместе с тем, приходится признать, что содержание этих работ так и не было правильно понято. Прежде всего, это непонимание того факта, что источником возникновения динамических процессов в дискретных схемах является столкновение логико-алгебраического характера булевых функций (т.е. сугубо статического), реализуемых в таких схемах, и временного (т.е. динамического) характера входных процессов этих схем, проявляющегося в несовпадении моментов изменения состояний различных входов. Так, в книге [46] сказано: «Характер переходного процесса в дискретном автомате... определяется инерционными свойствами отдельных элементов (включая соединительные провода) и параметрами сигналов». Совершенно очевидно, что инерционные свойства элементов, соединительных проводов и т.д. появляются только в одной из многих возможных реализаций модели дискретного автомата (дискретной схемы) – технической! Во всех же остальных реализациях эти факторы отсутствуют, а динамические (переходные) процессы все равно присутствуют; они вызваны указанной выше причиной. Во-вторых, существует тенденция рассматривать непрерывно-логическую теорию дискретных схем просто как один из многих возможных подходов к изучению динамики таких схем [46]. Между тем, аппарат непрерывной логики позволяет выражать динамический процесс на выходе схемы аналитически в виде суперпозиции операций дизъюнкции и конъюнкции этой логики, совершаемых над моментами изменений состояний входов схемы, при любом количестве этих изменений и любой сложности схемы. Указанное свойство непрерывно-логического подхода к изучению динамики дискретных схем свидетельствует о его полной адекватности проблеме изучения динамики таких схем и тем самым – о его уникальности. Другие известные подходы к изучению динамики дискретных схем не адекватны этой проблеме и потому не уникальны.

Литература

1. Рогинский В. Н. Основы дискретной автоматики (статика и динамика дискретных автоматов). – М.: Связь, 1975.

2. Левин В. И. Логическая теория надежности сложных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

3. Левин В. И. Методы непрерывной логики в задачах управления // Автоматика и телемеханика. 2003. № 3.

4. Якубайтис Э. А. Асинхронные логические автоматы. – Рига: Зинатне, 1966.

5. Гинзбург С. А. Математическая непрерывная логика и изображение функций – М.: Энергия, 1968.

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

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

8. Левин В. И. Переходные процессы в типовых логических элементах // Автоматика и телемеханика. 1973. № 3.

9. Левин В. И. К анализу переходных процессов в комбинационных схемах // Elektronische Informationsverarbeitung und Kybernetik. 1973. B. 9. № 6.

10. Левин В. И. Переходные процессы в простейших асинхронных автоматах с памятью // Автоматика и вычислительная техника. 1974. № 2.

11. Левин В. И. Анализ динамики переключения автоматов с памятью // Автоматика и вычислительная техника. 1974. № 3.

12. Левин В. И. Уравнения в бесконечнозначной логике и переходные процессы в конечных автоматах // Автоматика и вычислительная техника. 1974. № 5.

13. Левин В. И. Вычисление переходных процессов в комбинационных конечных автоматах // Problems of Control and Information Theory. 1974. Vol. 3. № 4.

14. Левин В. И. Таблицы для расчета и анализа переходных процессов в дискретных устройствах. – Рига: Зинатне, 1975.

15. Левин В. И. Введение в динамическую теорию конечных автоматов. – Рига: Зинатне, 1975.

16. Левин В. И. Исследование переходных процессов в замкнутых контурах автоматов // Кибернетика. 1977. № 3.

17. Левин В. И. Динамика логических устройств и систем. – М.: Энергия, 1980.

18. Левин В. И. Бесконечнозначная логика в задачах кибернетики. – М.: Радио и связь, 1982.

19. Левин В. И. Определители в бесконечнозначной логике и задачи укрупненного описания дискретных систем // Автоматика и вычислительная техника. 1976. № 5.

20. Левин В. И. Логические определители и автоматы с непрерывным временем // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1977. № 3, 4, 5.

21. Левин В. И. Динамические процессы в пороговых элементах // Автоматика и вычислительная техника. 1977. № 5.

22. Левин В.И. Динамические процессы в схемах с симметрическими функциями // Автоматика и вычислительная техника. 1977. № 6.

23. Левин В. И. Преобразование временных последовательностей в логических элементах // Известия вузов. Серия: Электромеханика. 1977. № 12.

24. Левин В. И. Динамические процессы в автоматах с периодическими воздействиями. I, II // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1985. № 4; 1986. № 1.

25. Левин В. И. Каноническое представление входных воздействий в динамике автоматов // Проблемы передачи информации. 1986. Т. 22. № 4.

26. Левин В. И. Вероятностное изучение переходных процессов в конечных автоматах // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1976. № 1.

27. Левин В. И. Исследование динамики дискретных автоматов с возможной неопределенностью значений сигналов. I, II // Кибернетика. 1988. № 6; 1989. № 2.

28. Левин В. И. Расчет динамики цифровых схем с памятью при неполностью определенных сигналах // Кибернетика. 1989. № 4.

29. Левин В. И. Приближенный расчет динамических процессов в дискретных схемах с неполностью определенными сигналами // Моделирование вычислительных систем и процессов. – Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 1989.

30. Левин В. И., Земцова Н. К. Переходные процессы в автоматах с частично определенными сигналами // Моделирование вычислительных систем и процессов. – Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 1989.

31. Левин В. И. Расчет динамических процессов в дискретных схемах с неполностью определенными сигналами методом эквивалентных схем // Вопросы управления и проектирования в информационных и кибернетических системах. – Уфа: Изд-во Уфимского авиационного института, 1989.

32. Левин В. И. Расчет динамических процессов в дискретных автоматах с неопределенными параметрами с помощью недетерминистской бесконечнозначной логики // Кибернетика и системный анализ. 1992. № 3.

33. Левин В. И. Оценки переходных процессов в конечных автоматах // Автоматика и вычислительная техника. – 1975. – № 4.

34. Левин В. И. Теория динамических автоматов. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 1995.

35. Левин В. И. Непрерывная логика. Ее обобщения и применения. I, II // Автоматика и телемеханика. 1990. № 8, 9.

36. Земцова Н. К. Расчет динамических процессов в цифровых вычислительных устройствах. – Пенза: Изд-во Пензенского политехнического института, 1982.

37. Линецкий С. А. Динамическое трехзначное моделирование цифровых схем // Моделирование вычислительных систем и процессов. – Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 1986.

38. Андрюшаев А. М. Автоматизация динамической диагностики схем // Системы автоматизированного проектирования цифровых устройств. – Харьков: Изд-во Министерства обороны СССР, 1987.

39. Золоторевич Л. А. Применение динамического моделирования для решения задач диагностики цифровых устройств // Проблемные вопросы автоматизации производства и обработки информации. – Минск, 1987.

40. Перельройзен Е. З. Анализ трехмерных сцен по динамическим двумерным проекциям // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1982. № 4.

41. Меркулов В. А. Логические методы решения дискретных оптимизационных задач // Применение вычислительных методов в научно-технических исследованиях. Вып. 1. – Пенза: Изд-во Пензенского политехнического института, 1979.

42. Буланов А. Ф. Структурно-логический метод оптимизации в многомерных экстремальных задачах // Вопросы автоматизированного проектирования информационных и кибернетических систем. – Уфа: Изд-во Уфимского авиационного института, 1984.

43. Левин В. И. Математическое моделирование потока исторических событий методами теории автоматов // Гуманитарные науки и современность. – В. 5. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 1999.

44. Левин В. И. Автоматное моделирование исторических процессов на примере войн // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2002. № 2.

45. Левин В. И. Математическое моделирование Библии. Характеристический автоматный подход // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 1999. Т. 4. № 3.

46. Потехин А. И., Рогинский В. Н. Динамика дискретных автоматов // Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. 1977 (Итоги науки). – М.: Изд-во ВИНИТИ АН СССР, 1977.

47. Левин В. И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ. – М.: Изд-во «Наука», 1987.

48. Левин В. И., Волгин Л. И. Непрерывная логика. Теория и применения. – Таллинн: Изд-во АН Эстонии, 1990.

49. Левин В.И. Математические основы динамической диагностики цифровых систем. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного технического университета, 1994.

50. Левин В. И. Теория автоматов и моделирование сложных систем. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного технического университета, 1995.

51. Левин В. И. Математическое моделирование социально-экономических процессов. Автоматно-логические методы и модели. – Пенза: изд-во Пензенского технологического института, 1997.

52. Левин В. И. Структурно-логические методы в теории расписаний. – Пенза: изд-во Пензенской государственной технологической академии, 2006.

53. Левин В. И. Непрерывная логика(история, результаты, библиография). – Пенза: Изд-во Пензенской государственной технологической академии, 2008.

54. Левин В. И. Логические методы в теории надежности сложных систем. – Пенза: изд-во Пензенской государственной технологической академии, 2010.

55. Левин В. И. Логико-математические методы в технических, гуманитарных и общественных науках. – Пенза: изд-во Пензенского государственного технологического университета, 2014.

References

1. Roginsky V. N. F*undamentals of discrete automation (statics and dynamics of discrete automata)*. Moscow, Svyaz Publ., 1975. (in Russian).

2. Levin V. I. *Logical theory of reliability of complex systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. (in Russian).

3. Levin V. I. Methods of continuous logic in control problems. *Automation and Telemechanics*, 2003, no. 3. (in Russian).

4. Yakubaitis E. A. *Asynchronous logic automata*. Riga, Zinatne Publ., 1966. (in Russian).

5. Ginzburg S. A. *Mathematical continuous logic and the representation of functions*. Moscow, Energiya Publ., 1968. (in Russian).

6. Levin V. I. Reliability analysis of asynchronous devices. *Ways to improve the reliability of industrial automated control systems. Abstracts of reports of the republican seminar*. Part 1. Kiev, Publishing House of the Ukrainian Republican Board of NTO Priborprom, 1971. (in Russian).

7. Levin V. I. Infinite-valued logic and transients in finite automata. *Automation and computer technology*, 1972, no. 6. (in Russian).

8. Levin V. I. Transients in typical logic elements. *Automation and telemechanics*, 1973, no. 3. (in Russian).

9. Levin V. I. To the analysis of transients in combinational circuits. *Elektronische Informationsverarbeitung und Kybernetik*, 1973, b. 9, no. 6. (in Russian).

10. Levin V. I. Transients in the simplest asynchronous automata with memory. *Automation and computer technology*, 1974, no. 2. (in Russian).

11. Levin V. I. Analysis of the dynamics of switching automata with memory. *Automation and computer technology*, 1974, no. 3. (in Russian).

12. Levin V. I. Equations in infinite-valued logic and transients in finite automata. *Automation and computer engineering*, 1974, no. 5. (in Russian).

13. Levin V. . Calculation of transients in combinational finite automata. *Problems of Control and Information Theory*, 1974, vol. 3, no. 4. (in Russian).

14. Levin V. I. *Tables for calculation and analysis of transients in discrete devices*. Riga, Zinatne Publ., 1975. (in Russian).

15. Levin V. I. *Introduction to the dynamical theory of finite automata*. Riga, Zinatne Publ., 1975. (in Russian).

16. Levin V. I. Investigation of transients in closed circuits of automata. *Cybernetics*, 1977, № 3. (in Russian).

17. Levin V. I. Dynamics of logical devices and systems. Moscow, Energiya Publ., 1980. (in Russian).

18. Levin V. I. Infinite–valued logic in cybernetics problems. Moscow, Radio and Communications Publ., 1982. (in Russian).

19. Levin V. I. Determinants in infinite-valued logic and problems of the enlarged description of discrete systems. *Automation and computer engineering*, 1976, № 5. (in Russian).

20. Levin V. I. Logical determinants and automata with continuous time. *Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*, 1977, no. 3, 4, 5. (in Russian).

21. Levin V. I. Dynamic processes in threshold elements. *Automation and computer engineering*, 1977, no. 5. (in Russian).

22. Levin V. I. Dynamic processes in circuits with symmetric functions. *Automation and computer engineering*, 1977, no. 6. (in Russian).

23. Levin V. I. Transformation of time sequences in logical elements. *Izvestiya vuzov. Series: Electromechanics*, 1977, no. 12. (in Russian).

24. Levin V. I. Dynamic processes in automata with periodic effects. I, II. *News of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*, 1985, no. 4; 1986, no. 1. (in Russian).

25. Levin V. I. Canonical representation of input effects in the dynamics of automata. *Problems of information transmission*, 1986, vol. 22, no. 4. (in Russian).

26. Levin V. I. Probabilistic study of transients in finite automata. *Izvestiya AN SSSR. Technical cybernetics*, 1976, no. 1. (in Russian).

27. Levin V. I. Investigation of dynamics of discrete automata with possible uncertainty of signal values. I, II. *Cybernetics*, 1988, no. 6; 1989, no. 2. (in Russian).

28. Levin V. I. Calculation of dynamics of digital circuits with memory with incompletely defined signals. *Cybernetics*, 1989, no. 4. (in Russian).

29. Levin V. I. Approximate calculation of dynamic processes in discrete circuits with incompletely defined signals. *Modeling of computing systems and processes*. Perm, Publishing House of Perm State University, 1989. (in Russian).

30. Levin V. I., Zemtsova N. K. Transients in automata with partially defined signals. *Modeling of computing systems and processes*, Perm, Publishing House of Perm State University, 1989. (in Russian).

31. Levin V. I. Calculation of dynamic processes in discrete circuits with incompletely defined signals by the method of equivalent circuits. *Management and design issues in information and cybernetic systems*. Ufa, Publishing House of the Ufa Aviation Institute, 1989. (in Russian).

32. Levin V. I. Calculation of dynamic processes in discrete automata with indeterminate parameters using non-deterministic infinite-valued logic. *Cybernetics and system analysis*, 1992, no. 3. (in Russian).

33. Levin V. I. Estimates of transients in finite automata. *Automation and computer engineering*, 1975, no. 4. (in Russian).

34. Levin V. I. *Theory of dynamical automata*. Penza, Publishing House of the Penza State University, 1995. (in Russian).

35. Levin V. I. Continuous logic. Its generalizations and applications. I, II. *Automation and telemechanics*, 1990, no. 8, 9. (in Russian).

36. Zemtsova N. K. *Calculation of dynamic processes in digital computing devices*. Penza, Publishing House of the Penza Polytechnic Institute, 1982. (in Russian).

37. Linetsky S. A. Dynamic three-digit modeling of digital circuits. *Modeling of computing systems and processes*. Perm, Publishing House of Perm State University, 1986. (in Russian).

38. Andryushaev A. M. Automation of dynamic diagnostics of circuits. *Systems of automated design of digital devices*. Kharkiv, Publishing House of the Ministry of Defense of the USSR, 1987. (in Russian).

39. Zolotorevich L. A. Application of dynamic modeling for solving problems of diagnostics of digital devices. *Problematic issues of automation of production and information processing*. Minsk, Universitetskoe, 1987. (in Russian).

40. Perelroizen E. Z. Analysis of three-dimensional scenes by dynamic two-dimensional projections. *News of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*, 1982, no. 4. (in Russian).

41. Merkulov V.A. Logical methods for solving discrete optimization problems. *Application of computational methods in scientific and technical research*. Issue 1. Penza, Publishing House of Penza Polytechnic Institute, 1979. (in Russian).

42. Bulanov A. F. Structural-logical optimization method in multidimensional extreme problems. *Issues of computer-aided design of information and cybernetic systems*. Ufa, Publishing House of the Ufa Aviation Institute, 1984. (in Russian).

43. Levin V. I. Mathematical modeling of the flow of historical events by methods of automata theory. *Humanities and modernity*, vol. 5, Penza, Publishing House of the Penza State University. 1999. (in Russian).

44. Levin V. I. Automatic modeling of historical processes on the example of wars. *Radioelectronics. Computer science. Management*, 2002, no. 2. (in Russian).

45. Levin V. I. Mathematical modeling of the Bible. Characteristic automatic approach. *Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*, 1999, vol. 4, no. 3. (in Russian).

46. Potekhin A. I., Roginsky V. N. *Dynamics of discrete automata. Theory of probabilities. Mathematical statistics. Theoretical cybernetics*. 1977 (Results of Science). Moscow, VINITI Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1977. (in Russian).

47. Levin V. I. *Structural and logical methods for the study of complex systems using computers*. Moscow, Nauka Publishing House, 1987. (in Russian).

48. Levin V. I., Volgin L. I. *Continuous logic. Theory and applications*. Tallinn, Publishing House of the Estonian Academy of Sciences, 1990. (in Russian).

49. Levin V. I. *Mathematical foundations of dynamic diagnostics of digital systems*. Penza, Publishing House of the Penza State Technical University, 1994. (in Russian).

50. Levin V. I. *Theory of automata and modeling of complex systems*. Penza, Publishing House of the Penza State Technical University, 1995. (in Russian).

51. Levin V. I. *Mathematical modeling of socio-economic processes. Automaton-logical methods and models*. Penza, Publishing House of the Penza State Technical University, 1997. (in Russian).

52. Levin V. I. *Structural and logical methods in the theory of schedules*. Penza, Publishing House of the Penza State Technical Academy, 2006. (in Russian).

53. Levin V. I. *Continuous logic (history, results, bibliography)*. Penza: Publishing House of the Penza State Technical Academy, 2008. (in Russian).

54. Levin V. I. Logical methods in the theory of reliability of complex systems. Penza, Publishing House of the Penza State Technical Academy, 2010. (in Russian).

55. Levin V. I. Logical and mathematical methods in technical, humanitarian and social sciences. Penza, Publishing House of the Penza State Technical University, 2014. (in Russian).

Статья поступила 10 сентября 2022 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, Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а/11.

Logical modeling of the dynamics of discrete circuits: to the 50th anniversary of the discovery

V. I. Levin

Relevance. *2022 marks the 50th anniversary of an important event in the history of cybernetics – the discovery of an adequate mathematical apparatus for studying the dynamics of discrete systems. In this regard, it is useful to comprehend what was done then, to assess the impact of what was done on science and society.* ***The purpose of the article*** *is to use the results obtained in this field to form an understanding of the fundamental processes of evolutionary and revolutionary approaches to the formation of new scientific knowledge, the laws of the development of science among novice scientists.* ***Result:*** *To achieve the objectives of the article, the domestic literature on Cybernetics and on the history of science, the works of the author himself, the memoirs of his colleagues are used. The article describes the meaning of the author's scientific results, the possibilities of their use in engineering and other fields. The author's scientific biography in the period under review is recreated. The memoirs of his colleagues and acquaintances were used.* ***Novelty and theoretical significance.*** *The article recreates for the first time the history of the creative activity of domestic and foreign scientists, which led to the discovery of an adequate mathematical apparatus for studying the dynamics of discrete systems. The work will be useful for young scientists studying the methodology of scientific research, as well as specialists working on complex scientific problems as an example of their successful resolution.*

Keywords: *discrete systems, system dynamics, logical modeling.*

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; optimization, decision making, recognition, automata theory, reliability theory, problems of education, history of science. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, Baidukova pr. / Gagarina st., 1a/11.