
Логика и техника: от теории электрических цепей к наносистемотехнике

В. Г. ГОРОХОВ

ABSTRACT. Relay and switching circuits is the first model of the realization of the logical operations in modern technology. The concept of the equivalent operator electric circuits played one of the important roles in electrical engineering and especially in communication engineering. Each functional element of this circuit corresponds with the definite mathematical formulation or mathematical operation (differentiation, integration etc.). Such method of the construction and transformation of structural schemes of the automatic control systems and algebra of the structural transformation was developed by academician B.N. Petrov.

Keywords: logic circuitry, relay and switching circuit, electric circuit theory, theory of servomechanisms, simulation modeling, nano systems engineering

Проблема соотношения логики и техники в нашей стране имеет давнюю историю. Достаточно назвать работы Виктора Ивановича Шестакова [4, 5], Гелия Николаевича Поварова [20] и Дмитрия Александровича Поспелова [22], посвященные методам анализа и синтеза релейно-переключающих, или контактных схем. Данная статья посвящена истории развития этой проблематики через теорию автоматического регулирования, алгоритмические языки имитационного моделирования социально-экономических систем с выходом на нанотехнологию.

1 Теория релейно-переключающих схем

Релейно-переключающие схемы стали первой моделью для реализации логических операций в современной технике. На рис. 1

приведены основные логические элементы и соответствующие им логические операции [25].

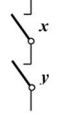
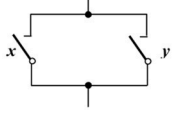
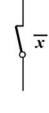
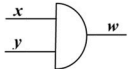
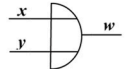
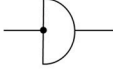
Название	Звено «и»	Звено «или»	Звено «не»																																				
Реле																																							
Переключательная функция	<table border="1"> <tr><td>x</td><td>y</td><td>w</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>L</td><td>0</td></tr> <tr><td>L</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>L</td><td>L</td><td>L</td></tr> </table>	x	y	w	0	0	0	0	L	0	L	0	0	L	L	L	<table border="1"> <tr><td>x</td><td>y</td><td>w</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>L</td><td>L</td></tr> <tr><td>L</td><td>0</td><td>L</td></tr> <tr><td>L</td><td>L</td><td>L</td></tr> </table>	x	y	w	0	0	0	0	L	L	L	0	L	L	L	L	<table border="1"> <tr><td>x</td><td>w</td></tr> <tr><td>0</td><td>L</td></tr> <tr><td>L</td><td>0</td></tr> </table>	x	w	0	L	L	0
x	y	w																																					
0	0	0																																					
0	L	0																																					
L	0	0																																					
L	L	L																																					
x	y	w																																					
0	0	0																																					
0	L	L																																					
L	0	L																																					
L	L	L																																					
x	w																																						
0	L																																						
L	0																																						
Способ записи в алгебре переключательных схем	$x \wedge y = w$	$x \vee y = w$	$\bar{x} = w$																																				
Символ																																							

Рис. 1

Но это было только начало. С появлением полупроводниковой техники релейно-контактные схемы в вычислительных устройствах были заменены на поставленные им в соответствие транзисторные схемы. Таблицу релейно-контактных и транзисторных схем, реализующих элементарные функции булевой алгебры, см. в [11, с. 149].

И хотя использование релейно-контактных элементов для построения логических схем вычислительных машин не оправдало себя ввиду низкой надежности, больших габаритов, большого энергопотребления и низкого быстродействия, релейно-контактные схемы начинают играть роль особых абстрактных объектов по отношению к их физически-конструктивной реализации в виде транзисторных схем. Они становятся посредниками между конструктивными схемами технических систем и их логико-математическим описанием. В этом смысле теория релейно-переключающих схем стала идеализированной моделью, хотя и основывающейся на анализе функционирования некоторых реальных объектов, но абстрагированной от их конкретного физического содержания. Алгебра логики переключающих схем «яв-

ляется орудием, которое может быть использовано для исследования сложных комбинационных и последовательных сетей с целью определения удовлетворительной схемы расположения контактов или отклонения неудовлетворительной такой схемы с минимальными затратами времени и усилий. ... Хотя алгебра переключательных схем может быть использована для проектирования простых электрических цепей, наиболее значительные успехи были достигнуты при применении этой алгебры для проектирования тех электрических схем, в которых управляющее и выходное воздействия являются сложными и взаимодействующими» [60, р. 282, 305]. Схематическое представление (см. рис. 2) ставится в соответствие определенным алгебраическим выражениям:

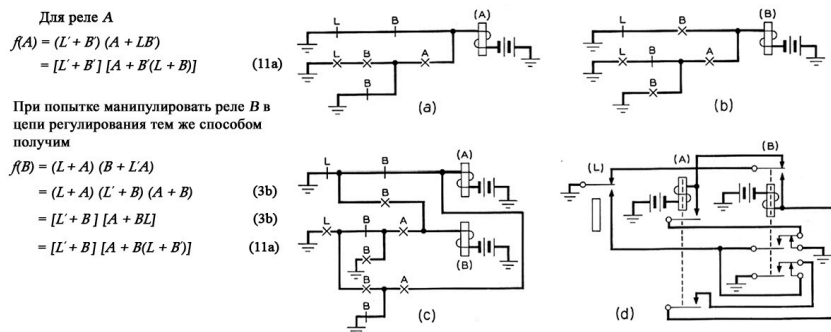


Рис. 2

Электрическая схема на рис. (с) получена с помощью комбинирования первых двух схем таким образом, что на реле L требуется только одно переключение. Однако требуется сделать два переключателя B . На рис. (d) показан распределитель импульсов [60, р. 304].

Однако такая констелляция техники и логики запрограммирована в самой природе технической теории. В структуре любой научной теории наряду с концептуальным и математическим аппаратом важную роль играют теоретические схемы, образующие своеобразный внутренний скелет теории. Эти схемы представляют собой совокупность абстрактных объектов, ориентированных, с одной стороны, на применение соответствующего математического аппарата, а с другой — на мысленный эксперимент, т.е. на проектирование возможных экспериментальных си-

туаций. Это — особые идеализированные представления (теоретические модели), которые часто выражаются графически (геометрически) или логически. В технике такого рода графические изображения играют еще более существенную роль, чем в естественной науке, поскольку одна из особенностей инженерного мышления заключается в оперировании схемами и модельными представлениями.

В научной теории имеют место *три основных уровня теоретических схем*: функциональные, поточные и структурные схемы.

Структурная схема исследуемой системы фиксирует конструктивное расположение ее элементов и связей, т.е. ее структуру с учетом предполагаемого способа реализации, и представляет собой теоретический набросок этой структуры с целью создать проект экспериментально-измерительной ситуации вместе с экспериментальным оборудованием. Структурная схема технической системы фиксирует те узловые точки, на которые замыкаются потоки (процессы функционирования): единицы оборудования, детали или даже целые технические комплексы, представляющие собой конструктивные элементы различного уровня. Такие схемы, однако, сами уже являются результатом некоторой идеализации. Это — пока еще теоретический набросок структуры будущей технической системы, который может помочь разработать ее проект, или исходное теоретическое описание существующей системы с целью ее теоретического расчета и поиска возможностей для усовершенствования.

Поточная схема описывает естественные, например, физические (электрические, механические, гидравлические и т.д.) процессы, протекающие в исследуемой системе, т.е. ее функционирование, и опирается на естественнонаучные, например, физические, представления. Однако в принципе это могут быть любые естественные процессы — не только физические, но и химические, биологические. Блоки таких схем отражают различные действия, выполняемые над естественным процессом элементами технической системы в ходе ее функционирования.

Функциональная схема фиксирует общее представление об исследуемой естественной или искусственной системе независимо от способа ее реализации и является общей для целого класса таких систем. Блоки этой схемы фиксируют только те свойства элементов системы, ради которых они включены в нее для выполнения общей цели, и выражают обобщенные логико-математические операции, а отношения между ними — определенные логико-математические зависимости. Однако они могут быть выражены и в виде декомпозиции взаимосвязанных функций, направленных на выполнение общей цели, предписанной данной системе, на основе которой строится алгоритм функционирования этой системы и выбирается ее конфигурация.

Транзисторные (*структурные*) схемы и релейно-контактные (*поточные*) схемы, реализующие элементарные функции булевой алгебры — конъюнкцию и дизъюнкцию, представленные в виде *функциональных* схем, и являются репрезентативным примером такого трехуровневого строения технической теории (см. рис. 2). Структурные схемы могут быть реализованы и на основе других элементов — электронных ламп, ферритовых сердечников, а позже интегральных схем или наносхем.

В естественнонаучной теории главное внимание уделяется не структурным, а поточным схемам, т.е. объяснению и предсказанию хода естественных процессов. Одна же из основных задач функционирования развитой технической теории заключается в тиражировании типовых структурных схем для всевозможных инженерных требований и условий, формулировка практико-методических рекомендаций инженеру-проектировщику. Ее абстрактным объектам обязательно должен соответствовать класс гипотетических технических систем, которые еще не созданы. В ней важен не только анализ, но и синтез теоретических схем новых технических систем. Поэтому Клод Шэннон, один из основоположников теории релейно-контактных схем, в своей классической работе «Символический анализ релейно-контактных схем» отдельную главу посвящает синтезу таких схем [57]. Конструктивная функция технической теории как раз и состоит в ее опережающем развитии по отношению к инженерной практике.

Функциональные схемы в теории электрических цепей, например, представляют собой графическую форму математического описания состояния электрической цепи. Каждому функциональному элементу такой схемы соответствует определенное математическое соотношение или вполне определенная математическая операция (дифференцирование, интегрирование и т.п.). Порядок расположения и характеристики функциональных элементов адекватны электрической схеме. Так, при расчете электрических цепей с помощью теории графов элементы электрической схемы — индуктивности, емкости, сопротивления и т.д. — заменяются по определенным правилам особым идеализированным функциональным элементом — унистором, который имеет только одно функциональное свойство пропустить электрический ток лишь в одном направлении. К полученной после такой замены однородной теоретической схеме могут быть применены топологические методы анализа электрических цепей.

На основе функциональной схемы составляется система уравнений, которая решается с помощью определенных математических методов (например, матричных). Эти уравнения получаются на основе физических законов (Ома, Кирхгофа и других), устанавливающих, например, зависимость между параметрами протекающего в цепи электрического тока и ее элементов¹. Известные из условия задачи их конкретные численные значения позволяют в результате решения данных уравнений вычислять неизвестные параметры тока и элементов цепи. На функциональной схеме проводится решение математической задачи с помощью стандартной методики расчета типовых способов решения задач на основе применения ранее доказанных теорем. Для этого функциональная схема по определенным правилам преобразования приводится к типовому виду (см. рис. 3).

¹«Простейшей и . . . совершенно удовлетворительной основой для составления уравнений теории электрических цепей являются законы Кирхгофа» [31, р. 287].

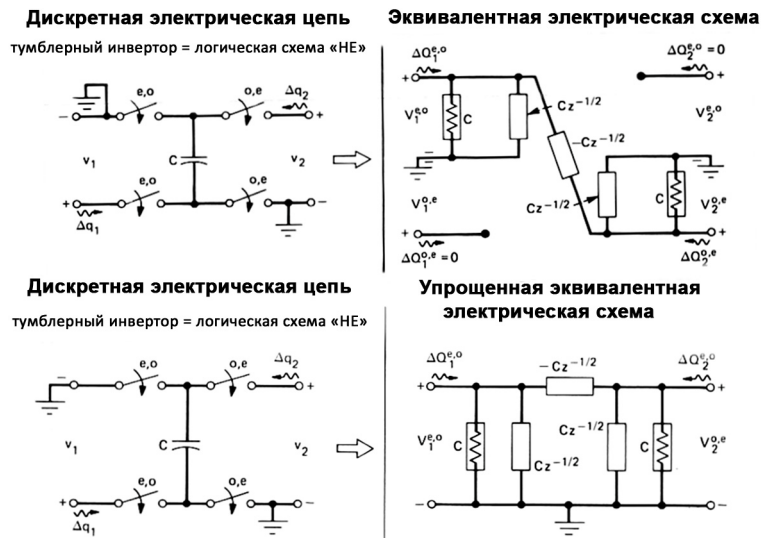


Рис. 3

Пример одного из унифицированных стандартных модулей (тумблерный инвертор, соответствующий логической схеме «НЕ») из общей библиотеки таких блоков для электрических схем с управляющим конденсатором [46, р. 739, 745].

Концепция эквивалентных электрических схем сыграла важную роль в электротехнике и особенно в технике связи. Одним из первых разработчиков этой концепции был математик и физик Георг Кэмпбэл, долгое время работавший в компании Белл-телефон, который, анализируя перекрестные помехи² в телефонных линиях, установил, что они зависят от емкостных связей, образующихся между длинными линиями [36, 43]. В своем меморандуме он пропагандирует метод поэтапных дедуктивных аппроксимаций [35] и ставит в соответствие исследуемым реальным электрическим цепям различные схемы замещения, например, мостовую или трансформаторную на основе идентичности их коэффициента пропускания и импеданса (выраженного математически)³.

²Взаимные искажения сигналов, «захлестывание», «перетекание» сигнала из одного канала связи в другой, электрические наводки, вызванные сигналами в соседних проводах, мешающие связи.

³Полное или комплексное сопротивление среды распространению электромагнитных волн, измеряемое в омах.

И если первоначально концепция эквивалентных электрических схем использовалась для описания пассивных электрических цепей, т.е. состоящих только из пассивных элементов — сопротивлений, емкостей и индуктивностей [53], то позднее была развита «общая теория активных⁴ электрических цепей» [53, р. 593-594] (см. рис. 4 А) и нелинейных схем, например, транзисторов [32, 13] (см. рис. 4 Б).

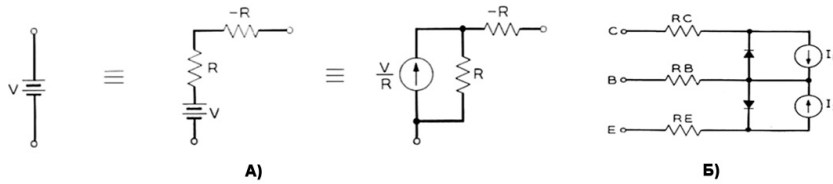
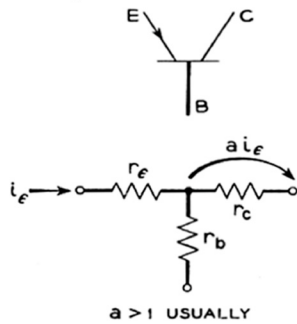


Рис. 4

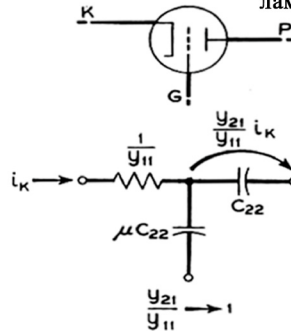
А) Эквивалентные схемы для идеального источника напряжения [45, р. 284]. Б) Модель транзистора [32, р. 1190].

С точки зрения эквивалентных схем теории электрических цепей отдельные ключевые элементы, такие, например, как транзистор и электронная лампа, являются полностью аналогичными по своему принципу действия, хотя и имеют совершенно различную физическую природу. Поэтому они отображаются на уровне функциональных схем аналогичными эквивалентными схемами замещения (см. рис. 5).

1. Транзистор



2. Электронная лампа (триод)



⁴Активным называется элемент, содержащий в своей структуре источник электрической энергии.

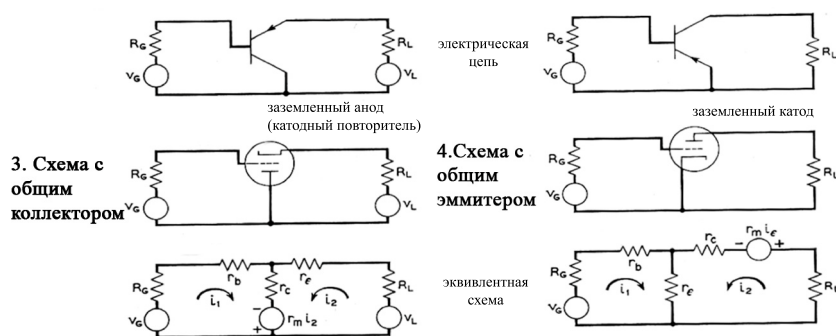


Рис. 5.

Аналогичность транзистора и электронной лампы [56, р. 375].

Одной из таких функциональных схем стали *операторные схемы*, использующие для анализа электрических цепей операционное исчисление, которое возникло сначала как частный методический прием для инженерных расчетов, а затем было обобщено на любые электрические схемы. Впоследствии операторное исчисление было переработано в еще более абстрактную форму, в которой оно нашло применение в самых разнообразных областях науки и техники⁵. Существуют определенные правила преобразования таких операторных схем, которые позволяют упростить их и, в конечном итоге, привести к скелетной (математической) схеме, где ветви изображаются просто линиями, а узлы — точками. Именно с помощью скелетной схемы составляются необходимые системы уравнений, решение которых позволяет рассчитать параметры цепи, и доказываются теоремы. «... Дифференциальные соотношения для оригиналов заменяются алгебраическими соотношениями для изображений, отражающими все исходные данные задачи, включая начальные условия. В этом и состоит суть операторного метода расчета переходных процессов: дифференциальные уравнения, описывающие переходный процесс, заменяются алгебраическими уравне-

⁵Операционное исчисление было разработано известным английским физиком и электротехником Оливером Хэвисайдом как «мощный метод решения дифференциальных уравнений теории электрических цепей», а затем получило «широкое применение не только в теории электрических цепей, но и для решения дифференциальных уравнений в математической физике» [31, р. 685].

ниями для изображений. Полученные операторные связи допускают схемную интерпретацию» (см. рис. 6) [18].

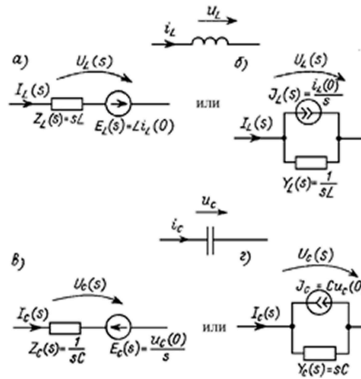


Рис. 6

Эквивалентные операторные схемы элементов электрической цепи: а) индуктивности, в) емкости.

К середине двадцатого столетия в теории цепей формируется новый этап, связанный с междисциплинарным исследованием различных типов цепей, не только электрических, но и кинематических, гидравлических и т.п. (см, например: [54, р. 1513]). В результате теория цепей превратилась в междисциплинарную техническую теорию — теорию автоматического регулирования, которая стала следующим важным шагом в развитии взаимоотношений логики и техники. «Абстрактное представление компонентов систем привело к развитию» «мета-языка», «в котором манипулирование конфигурациями электрических цепей стало естественным следствием математики . . . Идеи линейных систем, возникшие в технике связи, были распространены на другие области, такие как техника автоматического регулирования . . . Инженеры из сфер техники связи и техники автоматического регулирования развили новый способ использования этих моделей, в которых такие абстрактные понятия, как, например, полюса, . . . или созвездие сигналов получили вполне осязаемую идентичность и ими стали оперировать самым конкретным образом . . . Было достигнуто очень важное сочетание математического моделирования систем, методов проектирования и компьютерной поддержки проектирования и анализа. . . это позволило инженерам работать одновременно с эквивалентными мо-

делями различного рода. . . И во все большей степени стало возможным конструировать устройства и системы, тесно связанные с математическими идеализациями» [29, pp. 333–334].

Это направление получило дальнейшее развитие в связи с применением для расчета электрических цепей компьютерной техники. Стали разрабатываться особые алгоритмы и моделирующие программы для логического проектирования электрических схем и их испытания с целью обнаружения неисправностей (см., например: [33]), а также логические схемы (см. рис.7А), эквивалентные различным электрическим или электронным схемам (см. на рис. 7В изображение триггера — спускового элемента многих электронных схем, который может быть реализован на различной физической основе, например, в виде транзисторной схемы).

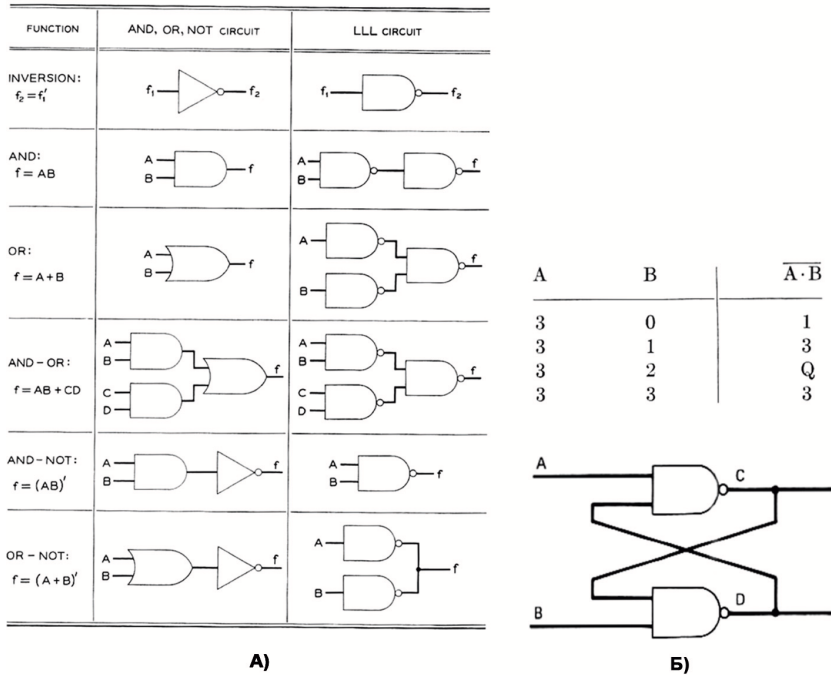


Рис. 7

А) Эквивалентные логические схемы (LLL — low-level logic — логические схемы с низкими логическими уровнями) [30, p. 2069]. В) Реализация таблицы истинности в виде логической схемы: таблица истинности (вверху) и схема триггера (внизу) [33, p. 1457, 1458].

2 Теория автоматического регулирования (ТАР)

Первоначально различного типа системы автоматического регулирования исследовались и рассчитывались по-разному. Однако постепенно формируются общие методы расчета, анализа и синтеза следящих систем. Классическая теория цепей стала постепенно превращаться «в чисто математическую дисциплину, которая оперирует с абстрактными структурами» [3, с. 870], и специализированный раздел знания более широкой научной дисциплины — теории систем. «Отличительной чертой теории систем является ее всеобщность и абстрактность, то, что она математически рассматривает свойства систем, а не их физическую форму. Таким образом, для теории систем неважно является ли система электрической, механической или химической. Главным являются математические соотношения между переменными, описывающими поведение системы» [10, с. 878] (см. также [39, р. 18–51]). В период становления ТАР уже появились такие классические технические науки, как, например, теория механизмов и машин и теоретическая радиотехника и электротехника. Поэтому ее формирование осуществлялось в двух основных направлениях: во-первых, за счет обобщения уже выработанных в этих дисциплинах теоретических средств и способов решения типовых задач и, во-вторых, в плане развития единого математического аппарата.

Первое направление развернулось примерно в 40–50-х гг. XX века, с одной стороны, на базе обобщения разработанных в теоретической радиотехнике способов анализа электрических цепей с помощью так называемых эквивалентных схем и соответствующих эквивалентных преобразований [16], а с другой стороны, для классификации и структурного анализа систем автоматического регулирования (динамических цепей) были использованы и обобщены методы классификации и структурного анализа механизмов, выработанные в теории механизмов для исследования кинематических цепей [8]. При этом стали «пользоваться терминами механики в более общем смысле, распространяя их и на иные динамические системы» [7, с. 5] (см. также [24]).

В обобщенных структурных схемах ТАР дается единообразное описание систем автоматического регулирования независи-

мо от конкретного конструктивного воплощения и типа протекающего в них естественного процесса — гидравлического, электрического, механического или пневматического. Все эти системы с математической точки зрения являются подобными: «...элементы регуляторов строятся на принципах использования электрической, тепловой и механической энергии. ... Тем не менее характер процессов, протекающих в системах автоматического регулирования в целом и в отдельных элементах цепи регулирования, во многом аналогичны. Математическое описание этих процессов оказывается одинаковым для самых разнообразных устройств независимо от их конструкции и принципа действия» [14, с. 10–11]. При создании конкретного устройства для выполнения определенной функции с заданными параметрами необходимо перевести эти, в основном физические, данные на математический язык и затем решать задачу за письменным столом так, чтобы получить нужные результаты в наилучшей системе автоматического регулирования [24]. Причем критерий качества такой системы формулируется математически, а реализация может быть в виде самых разнообразных конструкций. Эквивалентная электрическая модель сложного гидравлического устройства, позволяющая дать его упрощенное представление, и преобразование ее в блок-схему, компоненты которой выражают алгебраически математические соотношения между входом и выходом, была разработана Брауном и Кэмпбелом в 1948 г. [38, р. 112, 137] (цит. по: [28, р. 33]).

Одним из важнейших приложений ТАР, или, как ее называют в западной литературе, теории сервомеханизмов, стала радиолокация. Радиолокационные станции соединили в себе сложные электронные и электрические системы с настолько же сложными механическими блоками. Для управления, например, сложным движением радиолокационной антенны стали разрабатываться сначала аналоговые автоматические следящие системы (см., например: [21]).

Второе направление начало активно разрабатываться с 50-х гг., когда задачами ТАР занялись математики, что способствовало быстрому развитию линейной теории управления. В результате были разработаны единые математические методы анализа и синтеза систем автоматического регулирования

практически любого типа независимо от способа их инженерной реализации. «По-видимому, теория автоматического регулирования единственная область техники, целесообразность которой обусловлена не общностью решаемых проблем или машин, с которыми приходится иметь дело, а с математическими методами» [2, с. 3].

Для обеспечения эффективного функционирования ТАР необходимо было ликвидировать разрыв между таким единым математическим описанием и разнородными поточными и структурными теоретическими схемами, к которым оно применялось. Такие схемы часто заимствовались из соответствующих технических наук без какой-либо перестройки. Это привело к выделению особого звена — регулятора — механических, гидравлических, электрических и т.п. устройств, к которым наиболее хорошо применимы данные методы, как объекта исследования ТАР⁶.

Развиваются общие методы исследования различных типов регуляторов, составляются сравнительные таблицы эквивалентных механических, электрических и гидравлических регуляторных схем и их частотных характеристик (см., например [52, с. 256–257]). Понятия, принципы анализа и математический аппарат, развитые первоначально в одной из частей ТАР, например, для исследования регуляторов в теории электрических цепей, нашли применение в других ее областях. Это стимулировало развитие особых структурных схем, обобщенных по отношению к частным теоретическим схемам теории механизмов, теоретической радиотехники и электротехники, гидравлики и т.д.

Для анализа обобщенных структурных схем стали применяться такие математические методы, как теория графов, векторный анализ, теория матриц и т.п. (см. на рис. 8 реализацию матричного уравнения в виде такой блок-схемы). «Язык и схемы, используемые для анализа систем автоматического регулирования, увели от физических систем в сторону систем, просто описываемых с помощью разработанного метаязыка. . . . Однако блок-схемы и математические абстракции дали нечто большее, чем просто средства коммуникации. . . . моделирование сделало системы автоматического контроля более доступными для

⁶Примеры различной реализации колебательного звена — функционального элемента систем автоматического регулирования см. в [14, с. 17].

сложной математики. Но, пожалуй, наиболее важно то, что они позволили решать теперь проблемы на бумаге, а не в лаборатории. С помощью абстрактного моделирования стало возможным исследовать новые разработки с точки зрения стабильности, оптимизации, живучести, адаптивности и других свойств систем регулирования без обращения к физическим системам». Математическое моделирование позволило абстрагировать решение инженерных проблем от способов их физической реализации [28, р. 33,34].

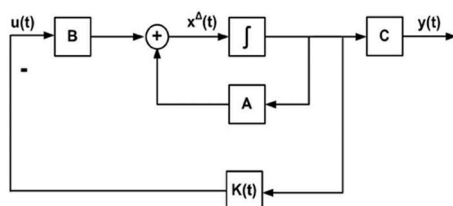


Рис. 8

Схема оптимального регулятора, построенного на основе матричного уравнения [63].

Такой метод структурных преобразований схем автоматических систем и адекватный им математический аппарат — алгебра структурных преобразований — был разработан академиком Б.Н. Петровым. В своей краткой и элегантно работе «О построении и преобразовании структурных схем», выполненной под руководством академика Н.Н. Лузина, он пишет: «При анализе и синтезе различных автоматических систем (регулирования, управления, следящих, телемеханических и т.п.), в особенности когда рассматриваются сложные системы, большое значение имеет ясное представление об их структуре, динамических свойствах отдельных элементов и их взаимодействии . . . Однако, насколько нам известно, не существует методики построения достаточно удобных и наглядных структурных схем, которые не только фиксировали бы наличие отдельных элементов в системе и связей между ними, но отображали бы динамические свойства этих элементов и характер воздействия их друг на друга. В настоящей работе делается попытка найти способ построения подобных схем . . . Структурные схемы способствуют наглядному представлению о характере и структуре системы, облегчают

анализ сложных систем и сравнение различных систем и вариантов их между собой, дают возможность произвести качественную оценку системы — установить наличие жестких и гибких обратных связей и других воздействий в системе, установить астатичность или наличие статизма системы и, кроме того, позволяют провести строгую и обоснованную классификацию автоматических систем» [19, с. 1146, 1162]. Такого рода обобщение в структурных схемах автоматического регулирования открыло целую серию исследований, направленных на анализ общей структуры сложных систем, независимо от способа их реализации (см. рис. 9).

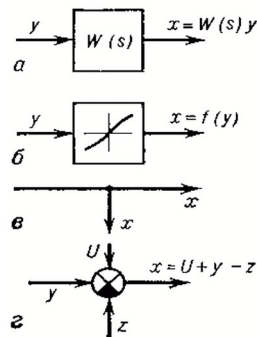


Рис. 9

Изображение элементов структурных схем: a — линейное звено; $б$ — функциональный преобразователь; $в$ — узел; $г$ — сумматор; $W(s)$ — передаточная функция; y, U, z — входные воздействия (сигналы); x — выходная величина (сигнал) [6].

Одним из таких направлений были автоматизированные системы управления предприятиями и отраслями промышленности, которые внедрялись в 70-е гг. прошлого века как в нашей стране, так и за рубежом, прежде всего на предприятиях военно-промышленного комплекса с целью оптимизации его весьма дорогостоящей и сложной многоуровневой деятельности. Здесь первоначально господствовало кибернетическое представление об управлении как реакции управляющего воздействия на отклонения регулируемой величины от запланированного результата. Это было связано с тем, что в данную отрасль пришли в основном инженеры, воспитанные на представлениях теории автоматического регулирования, показавшей свою успеш-

ную применимость в сфере проектирования чисто технических систем. Предприятия же и в еще большей степени отрасли промышленности и их системы управления представляют собой сложные социально-экономические системы, для описания которых концептуальных структур ТАР и даже кибернетики оказалось недостаточно.

Одной из интересных для нашей темы попыток алгоритмического описания сложных видов управленческой деятельности, подлежащей автоматизации, было создание формульно-операторного языка в Институте кибернетики Академии наук УССР, позволявшего в унифицированном виде описать действовавшие и новые организационные процедуры (подробнее см. [26]). В связи со свертыванием правительственной программы разработки АСУ, которая была тесно связана с плановой экономикой, исследования в этом направлении не получили дальнейшего развития. Однако это стимулировало серию исследований абстрактного уровня — так называемого структурного анализа, направленного на исследование общей структуры сложных систем. Для этого стали применяться современные математические средства, прежде всего топологические методы, например, теория графов, векторный анализ, а также теория матриц и т.д. При структурных исследованиях систем автоматического регулирования «в них не остается иного содержания, кроме связей, их числа, дифференциального порядка, знака и конфигурации», выявляются взаимные связи элементов системы, ее структура, что дает возможность «единообразно исследовать различные по своей природе системы» [17, с. 11–12].

Именно потребность моделирования сложных процессов и систем (прежде всего в сфере управления промышленными предприятиями)⁷ выдвинула в 1970-е гг. проблему создания специ-

⁷Речь шла о моделировании информационных процессов на предприятии в условиях новой ориентации экономики предприятия на применение компьютерной техники, поскольку любое предприятие стало рассматриваться не просто как бюрократическая в смысле Макса Вебера структура, а как система по переработке информации. (См.: [49, с. 5–6]). По мысли теоретиков этой новой ориентации имитационное моделирование должно помочь схватить предприятие в единстве и исследовать его общие структурные и процессуальные (имеется в виду процесс производства) взаимосвязи. (См. [48, с. 4, 7, 34, 37].)

альных программных средств такого рода моделирования, которое получило название имитационного моделирования⁸. «В социальных науках, физических науках, инженерии и сфере бизнеса существует множество проблем, которые могут быть выражены в математической форме, но нет аналитических методов для их решения. Компьютерное моделирование все в большей мере призвано исследовать такие проблемы». Модели сложных физических, экономических и социальных систем, с одной стороны, становятся все более приближенными к реальности, а с другой — все труднее формулируемыми в математической форме. Кроме того, создание компьютерных моделей сталкивалось с большими трудностями со стороны специалистов, недостаточно владеющих средствами современного программирования [63, р. 1–3]. Именно поэтому возникла необходимость разработки специально для этих целей особых языков программирования, которые получили название алгоритмических языков имитационного моделирования, ставших своего рода посредниками между структурным представлением сложных систем и их описанием на языках программирования высокого уровня. То есть фактически речь шла о развитии промежуточного уровня абстрактных теоретических схем между словесным и чисто математическим описаниями, который можно отнести к сфере особого квази-логического представления⁹. Компьютерная имитация часто рассматривается как символическая система — посредник между обычным языком и математикой, поэтому в ходе моделирования, программирования и модельного эксперимента выделяются следующие основные уровни абстрактного описания реальных систем: «концептуальная модель, логическая модель и компьютерная модель (программный код)» [47, с. 220]. Нас в данной статье будут интересовать именно особенности построения среднего уровня (т.е. логической модели).

Описываемые в рамках имитационной программы теории ста-

⁸ «Имитационной называется модель, которая воспроизводит все элементарные явления, составляющие функционирования исследуемой системы во времени с сохранением их логической структуры и последовательности» [12].

⁹ Примером такого описания могут служить операторные схемы Янова. «Первой работой, посвященной общей теории преобразования алгоритмов, явилась работа Ю.И. Янова «О логических схемах алгоритмов» [41].

новятся более точными (эта точность задается за счет использования синтаксических структур языков программирования), чем сформулированные на обычном языке. В то же время они являются более гибкими, чем обычным путем математически формализованные теории. Во многих науках, например, социальных науках, психологии, науках о поведении, где теории традиционно не могут быть настолько же формализованными и точными, как математизированные физические теории, такого рода логическая работа приводит к экспликации их теоретических положений и понятий, вскрытию разрывов в аргументации и обосновании теоретических предположений, проведению конструктивной критики этих теорий.

3 Алгоритмические языки имитационного моделирования

Особенность этих языков заключается в том, что каждый такой язык имеет тщательно разработанную систему абстракций, закрепленных в соответствующей концептуальной схеме и представляющих собой основу для формализации. В качестве примера рассмотрим один из «самых удачных на то время проблемно-ориентированных языков программирования» — GPSS (Система общецелевого моделирования — General Purpose Systems Simulator). «Проблемной областью GPSS являются системы массового обслуживания (системы с очередями). . . . Основой имитационных алгоритмов в GPSS является дискретно-событийный подход. . . ». Целью его создания было обеспечение пользователя инструментом, который мог использоваться и не программистом. Общий метод в разработке имитационных приложений состоит в том, что в качестве их основы берется простейшая модель, к которой затем добавляются все новые и новые детали. GPSS для этого хорошо приспособлен¹⁰.

¹⁰ «Первая версия системы появилась в 1961 году и называлась GPSS. Далее последовательно друг за другом появились GPSS II (1963), GPSS III (1965), GPSS/360 (1967), GPSS V (1971). Все эти версии были разработаны и поддерживались фирмой IBM. Наиболее удачны были две последние версии. . . . Появление персональных ЭВМ и принципиально новых идей и подходов взаимодействия человека с ЭВМ не могло не отразиться на GPSS. Он несколько утратил свою привлекательность. Появились новые системы моделирования, использующие возможности новой техники — оператив-

Структура моделируемой системы описывается в GPSS в форме блок-схемы, вычерченной из заранее определенных стандартных блоков. Каждый тип блока представляет собой специфическую деятельность, т.е. характеризует некоторую базисную операцию, которая осуществляется в системе. Наиболее важный класс объектов — это транзакты, которые движутся в системе, производя ряд воздействий на ее статические элементы (системное оборудование) — установки (средства обслуживания, устройства для последовательной обработки транзактов), хранилища (память, склад — служит параллельной обработке транзактов) и логические переключатели, выполняющие функцию регуляторов потоков в модели и имеющие два состояния («включен» и «выключен»). «Язык GPSS представляет собой интерпретирующую языковую систему, применяющуюся для описания пространственного движения объектов. Такие динамические объекты в GPSS называются транзактами и представляют собой элементы потока. В процессе имитации транзакты “создаются” и “уничтожаются”. . . . Каждый транзакт имеет набор параметров» [12]. Подобно реальному объекту, перемещающемуся в моделируемой системе, транзакт совершает движение через программу, выполняя тем самым ее операторы. Для наблюдения за функционированием модели используются статистические элементы языка, к которым относятся очереди (ведут подсчет среднего числа задержанных транзактов и средней продолжительности таких задержек) и таблицы, которые используются для исследования частот любой случайной величины. Учет очередей составляет одну из основных функций этой системы моделирования, причем «основные выходные данные, такие как очереди и статистика, получаются автоматически без какого-либо программирования» [34, р. 569].

ность, интерактивность, наглядность при разработке моделей и проведении исследований. Но, пройдя нелегкий путь переосмысления и адаптации к новым условиям, GPSS выжил. Огромный потенциал, заложенный в алгоритмах дискретно-событийного подхода к моделированию, исключительно лаконичная проблемная ориентация языка и энтузиазм разработчиков позволил это сделать. . . . Таким образом, GPSS активно развивался и развивается. . . . В последние годы в связи с возрождением интереса к GPSS начали появляться много новых учебно-методических материалов» [9]. См. также [23, [27, 40].

Главным для GPSS является имитирование процессов функционирования системы, описываемых блок-схемой, которая фактически представляет собой поточную теоретическую схему. Блоки этой схемы, связанные со статическими элементами, характеризуют определенные состояния системы в процессе ее функционирования, а блоки, связанные с транзактами, — связи перехода между этими состояниями. Линии, соединяющие блоки, указывают пути движения транзактов в системе, т.е. описывают последовательность происходящих в ней событий. Описание модели в виде блок-схемы автоматически переводится в машинную кодовую модель, представляющую собой функциональную (математическую) теоретическую схему. В то же время каждому из элементов модели могут соответствовать различные реальные объекты: установка может означать кассу в банке или причал в порту, хранилище может быть дорогой или гаванью, логический переключатель — реле или светофором, а транзакты — автомобилями, судами или сообщениями. Отношения между ними отражаются в «очередях» и «таблицах».

На рис. 10 приводится пример поточной схемы для простейшей портовой системы [15], но это может быть и описание алгоритма проектирования или процесса обработки деталей на промышленном предприятии. Алгоритмический язык имитационного моделирования — GPSS — «является инструментом, который инженер-системотехник может использовать для конструирования способной к саморазвитию модели и манипулирования ею. Он может быть использован для моделирования совершенно различных физических систем». Однако важно учитывать, что любые такие модели не в состоянии полно отражать оригинал. «Моделирование — это не копирование. Имитационная (или математическая) модель располагает относительно небольшим числом свойств, которые соответствуют (правда, всегда с помощью аппроксимации) моделируемой реальности». Модель, выраженная в подобном языке, служит основой для проведения компьютерных экспериментов (т.е. варьирования параметрами модели) и сбора статистических данных для последующего их сравнительного анализа [58, р. 33–35].

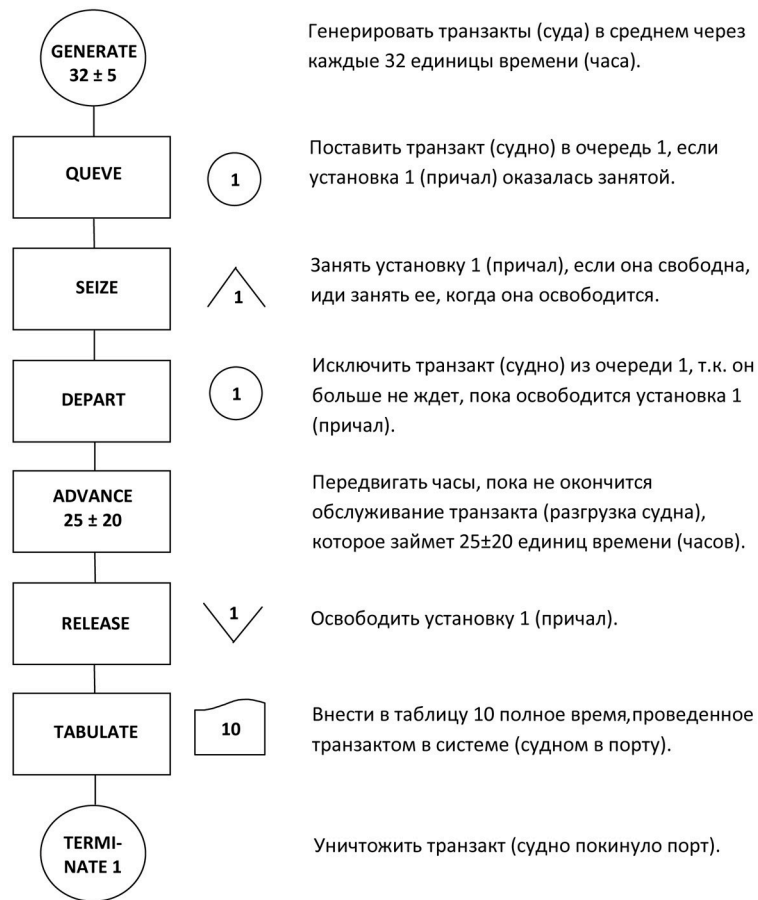


Рис. 10

Представление жизни модели (порта) как течение временных транзактов (судов), продвигающихся в модели и обслуживающихся в постоянных устройствах (портовых терминалах) [15, с. 475]. Условные обозначения на блок-диаграммах GPSS (Подробнее см.: 37, 55, 61): GENERATE — Генерирует транзакты через A единиц времени, модифицированных B с задержкой C, D транзактов, с приоритетом E, форматом FB; QUEUE — Обеспечивает занятие B мест в очереди A; SEIZE — Занимает устройство с номером A; DEPART — Обеспечивает освобождение в очереди A B единиц; ADVANCE — Задерживает транзакт на время A±B, если B — const, или A·B, если B — функция; RELEASE — Освобождает устройство с номером A; TABULATE — Табулирует значения входящих транзактов в таблице A; TERMINATE — Уничтожает A транзактов.

Таким образом, строго определенные понятия алгоритмических языков имитационного моделирования позволяют осуществить формализацию различных аспектов модели и реализовать ее на компьютере. В понятиях алгоритмических языков имитационного моделирования задается «образ» объекта, детерминированный той или иной математической теорией, интерпретацией которой является данный язык (например, теорией массового обслуживания). Поэтому концептуальный каркас такого языка в значительной степени определяет и область его применения. Для описания взаимосвязей элементов системы, а также системы и системного окружения и для ее иерархического представления используются главным образом теория множеств и исчисление предикатов.

Особое значение имитационное моделирование на ЭВМ приобретает в рамках системотехники.

4 Логические схемы в наносистемотехнике

В системотехнике в отличие от классической технической теории математические схемы строятся не только над уровнем поточных, но и структурных схем. В ней формируются особые *абстрактные структурные схемы*, представляющие собой обобщение структурных схем теории автоматического регулирования, теории сетей связи, теории синтеза релейно-контактных схем и логических схем вычислительных машин и т.п., которые развиваются в структурном анализе сложных систем и позволяют «изучать объект в наиболее чистом виде», анализировать конфигурацию системы, степень связности и надежности ее элементов безотносительно к их конструктивному исполнению. *Абстрактные алгоритмические схемы* обобщены в кибернетике и описывают преобразования потока субстанции (вещества, энергии и информации) независимо от его реализации, дают идеализированное представление функционирования любой системы (в том числе и самой системотехнической деятельности, рассмотренной как система) и являются исходным пунктом компьютерного программирования. Они — результат абстрагирования от качественной определенности протекающего через

систему и преобразуемого ею естественного процесса (который лишь в частном случае будет физическим процессом). Увеличение вычислительных мощностей компьютеров сделало возможным определение не только макроструктур, но и с высокой точностью геометрической и электронной структуры больших молекул. Это положило начало новому этапу развития системотехники — наносистемотехники, где методы и схемы ТАР также нашли свое применение (см. на рис. 11 структурную схему, описывающую систему автоматического регулирования нанодиска — Disk Drive Servo Control).

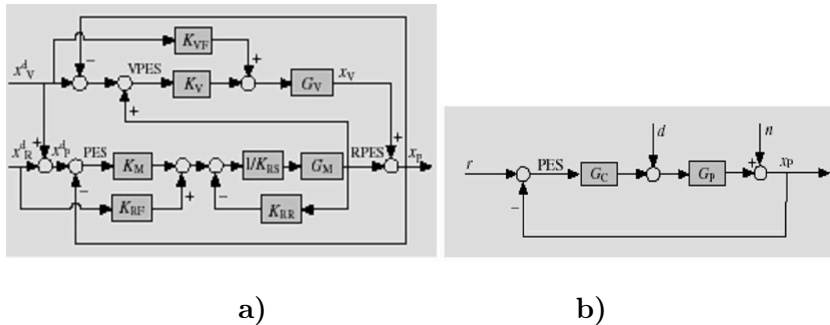


Рис. 11

а) самонастраивающийся микропривод, б) структурная схема сервомеханизма на наноуровне — Disk drive servo control (PES — расположение сигнала ошибки; биение — r , нарушение выхода — d , и помехи при измерении — n ; $GP(s)$ и $GC(s)$ представляют привод движения диска и регулятор, а r и x_P — трек биения и главную позицию, соответственно [59, р. 969, 974].

Нас в данной статье, однако, интересует соотношение наносистемотехники с логикой. Ниже приводятся примеры реализации стандартных логических элементов «не», «или», «и» с помощью молекулярных переключателей и составления из них простейших логических схем. Например, на рис. 12 продемонстрирована комбинационная логическая схема (комбинаторная логика) на молекулярном уровне. Генерация сигналов производится с помощью видимого или ультрафиолетового света, который вызывает химические изменения в *молекулярном ключе*, работающем фактически аналогично механическому переключателю в релейно-контактных схемах.

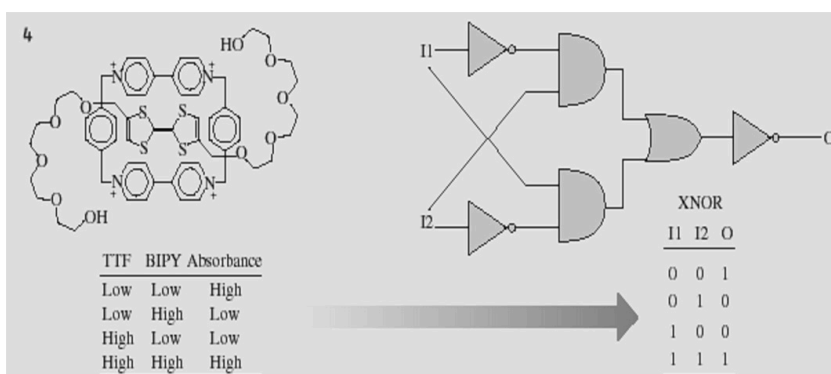


Рис. 12

Пропускаемость заряда через комплекс 4 является высокой, если к блоку tetrathiafulvalene (ТТФ) приложено высокое входное электрическое напряжение, и это стимулирует блоки bipyridinium (BIPY) иметь высокое напряжение, и наоборот. Сигнал преобразования системы 4 переводится в таблицу истинности схемы «исключающее НЕ-ИЛИ» [59, р. 18] (см. на рис. справа).

Еще одним интересным применением наносистемотехники является спинтроника, использующая в качестве ключевого элемента «спиновый клапан» (“spin valve”), схематически показанный на рис. 13. В классической электронике спин (собственный магнитный момент) электрона не играл никакой роли¹¹, а в спинтронике именно это его свойство используется в качестве ключевого элемента¹².

¹¹В полупроводниках электрон рассматривается вместе с «дырками» как взаимосвязанная пара, а в спинтронике учитывается спин электрона, т.е. направление его вращения, что не принимается во внимание в классической электронике [51, р. 185].

¹²В так называемой магниторезистивной памяти — MRAM (Magnetoresistive RAM), которая сможет заменить механически действующий жесткий диск современных компьютеров, информация запоминается благодаря использованию различных состояний спина электрона, меняя спин у отдельного электрона в единственном атоме. Это может привести к созданию квантовых компьютеров, обладающих большим быстродействием и меньшим потреблением энергии (см. [50, р. 27], особенно если они будут строиться на графеновой основе [42]).

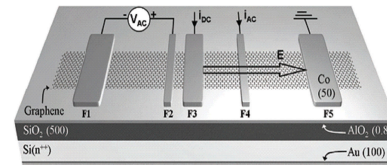


Рис. 13

Спиновый вентиль (рисунок слева) на основе использования эффекта полевого транзистора на двумерной графеновой структуре (тонкий графеновый слой, толщиной в один атом): на схеме изображены детекторы (F2, F1), электроды (F3, F4) и ферромагнитный кобальтовый электрод (F5), переносимый электрон (E), постоянный (IDC) и переменный (IAC) электрический токи, переменное электрическое напряжение (VAC). Наблюдается явный биполярный (изменение от положительного к отрицательному знаку под влиянием изменения направления постоянного электромагнитного поля) «спинный сигнал» [44, р. 10].

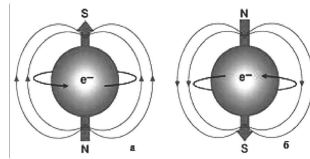


Рис. 14

Рисунок иллюстрирует спин электрона [42]¹³.

Таким образом, для современной науки и техники совершенно неважно, как, собственно говоря, выглядит действительная реальность. Важно лишь то, что ученый и инженер с ее помощью могут правильно заранее спланировать и реализовать свою деятельность и получить желаемые результаты. Этой цели и служат разнообразные графические представления и модели, которые развиваются сегодня и в наносистемотехнике. Хотя такое графическое представление еще далеко от совершенства,

¹³В дополнение к электрическим свойствам электрона в электронике могут быть использованы его магнитные свойства — спин. Спинтроника может быть рассмотрена как основа технологии создания квантового компьютера, поскольку она позволяет манипулировать электроном как квантово-механической волной, а не как частицей [50, р. 27].

поскольку оно является лишь первой попыткой построить абстрактную алгоритмическую модель нанопроцесса, называемого самосборкой наноструктур.

На рис. 15 показана последовательность фотохимических превращений краунсодержащих красителей в растворах в присутствии катионов металлов. Варьируя концентрацию катионов и длину волны возбуждающего света, можно изменить направление фотохимических превращений [1].

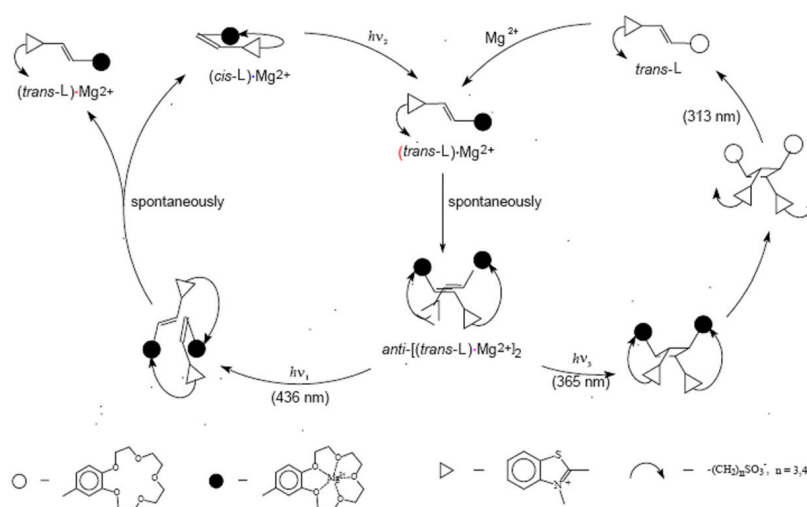


Рис. 15

Относительно приведенной на рис. 15 схемы синтеза наноструктур можно повторить слова академика РАН Б.Н. Петрова, сказанные им еще в 1945 г. относительно структурных схем теории автоматического регулирования: «При анализе и синтезе различных... систем..., в особенности, когда рассматриваются сложные системы, большое значение имеет ясное представление об их структуре, динамических свойствах отдельных элементов и их взаимодействии... Структурные схемы способствуют наглядному представлению о характере и структуре системы, облегчают анализ сложных систем и сравнение различных систем и вариантов их между собой, дают возможность произвести качественную оценку системы ...» [19, с. 1146, 1142].

Таким образом, как в научных теориях, так и в прикладных областях возрастает роль построения различного рода логиче-

ских моделей, призванных, с одной стороны, объединять разрозненные дисциплинарные научные знания, а с другой — служить своего рода «проектом» будущих разработок, ориентированных на применение.

Литература

- [1] *Алфимов М.В.* Фотоника супрамолекулярных наноразмерных структур // Статья доступна на сайте http://www.photonics.ru/pics/5136ref/alf_article.pdf
- [2] *Ауслендер Д.М.* Развитие науки об автоматическом управлении // Динамические системы управления. Труды американского общества инженеров-механиков. 1972. Т. 94. №1.
- [3] *Белевич В.* Краткая история развития теории цепей // Труды института радиоинженеров. 1962. Т. 50. №5. Часть 1.
- [4] *Брюков Б.В.* К проблеме приоритета в открытии логической теории релейно-контактных схем. Документы из архива Виктора Ивановича Шестакова // Логические исследования. Вып. 15. М.: Наука, 2009.
- [5] *Брюков Б.В., Шахов В.И.* Первые приложения логики к технике: Эренфест, Герсеванов и Шестаков. От применения логики к расчету сооружений и релейным схемам к логической теории размерностей физических величин // Логические исследования. Вып. 14. М.: Наука, 2007.
- [6] *Воронов А.А.* Структурная схема // БСЭ. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/136582/>
- [7] *Воронов А.А.* Элементы теории автоматического регулирования. М.: Военное изд-во, 1950.
- [8] *Гальперин И.И.* Структурное исследование регулируемых систем // Известия ВТИ. 1941. №4.
- [9] *Девятков В.В.* GPSS <http://www.gpss.ru/>
- [10] *Заде Л.* От теории цепей к теории систем // Труды института радиоинженеров. 1962. Т. 50. №5. Ч. 1.
- [11] *Захаров В.Н., Поспелов Д.А., Хазацкий В.Е.* Системы управления. М.: Энергия, 1977.
- [12] Имитационное моделирование на языке GPSS / Сост. Алтаев А.А. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2001. <http://www.ict.edu.ru/ft/004998/Mtduksi2.pdf>
- [13] *Колосов С.П., Сидоров Ю.А.* Нелинейные двухполюсники и четырехполюсники. М.: Высшая школа, 1981.
- [14] *Лернер А.Я.* Расчленение систем автоматического регулирования на элементы. М.: Машгиз, 1949.
- [15] Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем / Под ред. Нейлора Т.М. М.: Мир, 1975 (Naylor T.H. (Ed.) Computer Simulation Experiments with Models of Economic Systems. N.Y.: John Wiley & Sons, 1971).
- [16] *Михайлов А.* Метод гармонического баланса в теории автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. 1938. №3.
- [17] *Нечипоренко В.И.* Структурный анализ и методы построения сложных систем. М.: Сов. Радио, 1977.
- [18] *Новгородцев А.Б.* 30 лекций по теории электрических цепей. Электронный учебник. Санкт-Петербургский Государственный Технический Университет, Кафедра Теоретических Основ Электротехники (Версия 2.00, 2002 г.) http://eelib.narod.ru/toe/Novg_2.01/index.htm
- [19] *Петров Б.Н.* О построении и преобразовании структурных схем // Известия АН СССР. ОТН, 1945.

- [20] *Поваров Г.Н.* Метод синтеза вычислительных и управляющих контактных схем // Автоматика и телемеханика. 1957. №2.
- [21] *Попов Е.П.* Следящая система <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/103/202.htm>
- [22] *Поспелов Д. А.* Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1974.
- [23] *Сталл И.* GPSS – 40 ЛЕТ РАЗВИТИЯ. Департамент управления высшего уровня экономики Стокгольмской школы экономики. Труды конференции WSC-2001, 9-12 декабря 2001 года / Перевод с английского к.т.н. Девятков В.В. (Элина-Компьютер, г. Казань) - http://www.gpss.ru/paper/stahl/index_w.html
- [24] Теория следящих систем / Под ред. Х. Джеймса, Н. Никольса, Р. Филлипса. М.: Ин. Лит., 1953 (пер. с англ.: Theory of servomechanisms. Ed. by H. James, N. Nichols, R. Phillips. N.Y. – L.: MIT, 1947).
- [25] *Хоффер А., Герхард Г.* Графические методы в управлении. М.: Экономика, 1971.
- [26] *Шкурба В.В.* Формульно-операторный язык // Автоматизированные системы управления предприятием. Киев, 1969.
- [27] *Шрайбер Т. Дюс.* Моделирование на GPSS. М.: Машиностроение, 1980.
- [28] *Bergbreiter S.* Moving from Practice to Theory: Automatic Control after World War II // History of Science, University of California, Berkeley, 2005 - <http://www.cs.berkeley.edu/~sbergbre/publications/BergbreiterHIS285S.pdf>
- [29] *Bissell Ch.* Models and 'black boxes': mathematics as an enabling technology in the history of communications and control engineering // Revue d'Histoire des Sciences. Vol. 57 (2). http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/rhs_0151-4105_2004_num_57_2_2215
- [30] *Cagle W.B., Menne R.S., Skinner R.S., Staehler R.E., Underwood M.D.* No. 1 ESS Logic Circuits and Their Application to the Design of the Central Control // Bell System Technical Journal. 1964. Vol. 43. Iss. 5.
- [31] *Carson J.R.* Electric Circuit Theory and the Operational Calculus // Bell System Technical Journal. 1925. Vol. 4. Iss. 4.
- [32] *Cermak I.A., Kirby Mrs. D.B.* Statistical Circuit Design: Nonlinear Circuits and Statistical Design // Bell System Technical Journal. 1971. Vol. 50. Iss. 4.
- [33] *Chappel S.G., Elmendorf C.H., and Schmidt L.D.* LAMP: Logic-Circuit Simulators // Bell System Technical Journal. 1974. Vol. 53. Iss. 8.
- [34] *Crain R.C.* Simulation using GPSS/H // Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference / S. Andradottir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson (eds.). Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997 - <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.24.1192&rep=rep1&type=pdf>
- [35] *Dr. Campbell's* Memoranda of 1907 and 1912 // Bell System Technical Journal. 1935. Vol. 14. Iss. 4. October 1935.
- [36] *George A. Campbell* 1870 - 1954 // Bell System Technical Journal. Vol. 34. Iss. 1. January 1955 .
- [37] *Gordon G.* The Application of GPSS V to Discrete System Simulation. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1975.
- [38] *Gordon S. Brown and Donald P. Campbell.* Principles of Servomechanisms: Dynamics and Synthesis of Closed-Loop Control Systems. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948.
- [39] *Gosling W.* The Design of Engineering Systems. London: Heywood & Company Ltd, 1962.
- [40] GPSS - 40 лет: перспективы развития. http://www.gpss.ru/paper/wsc2001/index_w.html
- [41] <http://knigechka.blogspot.com/2009/10/32.html>

- [42] <http://www.natureasia.com/asia-materials/highlight.php?id=264>
- [43] *Jewett, F.B. Dr. George A. Campbell* // Bell System Technical Journal, 1935, Vol. 14, Iss. 4
- [44] *Jozsa C., Tombros N., Popinciuc M., Jonkman H.T., Wees B.J. van.* Graphene spintronics — injection and transport // NIM workshop “Interactions in Hybrid Nanosystems”. Frauenworth, 2008.
- [45] *Kozemchak E.B., Murray-Lasso M.A.* Computer-Aided Circuit Design by Singular Imbedding // Bell System Technical Journal. 1969. Vol. 48. Iss. 1.
- [46] *Laker K.R.* Equivalent Circuits for the Analysis and Synthesis of Switched Capacitor Networks // Bell System Technical Journal, 1979. Vol. 58. Iss. 3.
- [47] *Liebl Fr.* Simulation: problemorientierte Einführung. München; Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1995.
- [48] *Ludewig J.* Simulationsmodelle ganzer Unternehmungen. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, 1969.
- [49] *Muller W.* Die Simulation betriebswirtschaftlicher Informationssysteme. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, 1969.
- [50] Nanotechnology Innovation for Tomorrow’s World. European Communities, 2004.
- [51] *Ohno H., Matsukura F.* A ferromagnetic III±V semiconductor: (Ga,Mn)As // Solid State Communications. 2001. Vol. 117. <http://www.elsevier.com/locate/ssc>
- [52] *Pestel E., Kolmann E.* Grundlagen der Regeltechnik. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1968.
- [53] *Peterson L.C.* Equivalent Circuits of Linear Active Four-Terminal Networks // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. Iss. 4.
- [54] *Rausch R.G.* The Analysis of Valve-Controlled Hydraulic Servomechanisms // Bell System Technical Journal. 1959. Vol. 38. Iss. 6.
- [55] *Rosmann H.* Simulation mit GPSS. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1978.
- [56] *Ryder R.M., Kircher R.J.* Some Circuit Aspects of the Transistor // Bell System Technical Journal. 1949. Vol. 28. Iss. 3.
- [57] *Shannon C.* Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits // Trans. of the Amer. Institute of Electr. Engineers. 1938. Vol. 57. <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/11173/34541425.pdf?sequence=1>
- [58] *Smith Jr. E.C.* Simulation in Systems Engineering // IBM Systems Journal. 1962. Vol. 1. Iss. 1.
- [59] Springer Handbook of Nanotechnology // B. Bhushan (Ed.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004.
- [60] *Staehler R.E.* An Application of Boolean Algebra to Switching Circuit Design // Bell System Technical Journal. 1952. Vol. 31. Iss. 2.
- [61] *Weber K., Trzebiner R., Tempelmeier H.* Simulation mit GPSS. Berlin und Stuttgart: Verlag Paul Haupt, 1983.
- [62] *Wintz N.J.* The Kalman filter on time scales. A Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of the Missouri University of Science and Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Mathematics, 2009 - http://scholarmine.mst.edu/thesis/pdf/Wintz_09007dcc806c8092.pdf
- [63] *Wyman F.P.* Simulation modeling: a guide to using SIMSCRIPT. N.Y., London etc.: John Wiley & Sons, Inc., 1970.