

УДК 681.5

**Воспоминания ветерана инженерной науки:  
Пневмоавтоматика. Логическое управление дискретными процессами.  
Моделирование сложных дискретных систем**

Юдицкий С. А.

*На примере научной биографии автора, охватывающей более полувека, рассмотрены некоторые проблемы управления: пневмоавтоматика как средство автоматизации производственных процессов; логическое управление дискретными процессами на основе графа операций и стандартной позиционной структуры; моделирование сложных систем с применением аппарата индикаторной логики и триадных сетей. Особый акцент при моделировании сделан на двух направлениях, в становлении и развитии которых автор принимал активное участие – моделировании поточных систем обработки мобильных объектов и триадного моделирования дискретных систем. Обзорно представлены методологические основы данных научных направлений, а также показаны прикладные задачи, которые могут быть успешно решены с использованием данного научно-методического аппарата.*

**Ключевые слова:** пневмоавтоматика, логическое управление, сеть Петри, граф операций, позиционная структура, поточная система с мобильными объектами, индикаторная логика, триадная сеть, многоагентная система, триадные дорожные карты.

В 1956 году я закончил Московский станко-инструментальный институт СТАНКИН и в числе группы из 10 выпускников был распределен в Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков ЭНИМС. В одной из лабораторий ЭНИМСа я писал диплом по исследованию упругих деформаций в плитах – основаниях станков, был очень увлечен этой работой и рассчитывал далее развивать ее. Но по правилам того времени нас всех для приобретения практического опыта на 2 - 3 года отправили на экспериментальный завод «Станкоконструкция», являющийся производственной базой ЭНИМСА. Я оказался в конструкторской группе при отделе главного технолога завода, занимающейся проектированием технологической оснастки – оправок, шаблонов и т.д. Работа вообще не требующая никакой квалификации, да и заявки из цехов на оснастку поступали не часто. Так что конструктора были в основном не загружены, но начальство это нисколько не беспокоило. Лишь бы отсиживали положенные рабочие часы. Такая ситуация была типичной для многих предприятий в советское время с конца 50-х.

Смириться я никак не мог, тянуло к исследовательской работе, в науку. На неоднократные просьбы перевести в ЭНИМС получал отказ. Попытался поступить на инженерный поток при Мехмате МГУ. Получил хорошую оценку на собеседовании, но в списке принятых себя не обнаружил. С такой фамилией в те годы на Мехмат (и не только на Мехмат) не брали. В 1958 г. попытался поступить в аспирантуру при ЭНИМСе. На вступительном экзамене по философии на вопрос о культе личности в армии ответил в духе решений 20-го съезда КПСС. Экзаменатор не прерывал, одобрительно кивал. И поставил тройку. Оказывается, надо было сделать упор на «культ маршала Жукова»,

которого незадолго до этого освободили от должности министра обороны. В аспирантуру не приняли.

Наконец, через 2,5 года «работы» на заводе, в апреле 1959 г. меня перевели в ЭНИМС в отдел гидравлики и пневматики. Это начало моей научной биографии. В ЭНИМСе я проработал до 1963 г. Затем поступил в очную аспирантуру при Институте автоматике и телемеханики АН СССР – прежнее название Института проблем управления, где и работаю более полувека. Мой путь в инженерной науке проходил через три проблемные области: пневмоавтоматику, логическое управление дискретными процессами в технических системах, моделирование функционирования сложных систем. В статье далее излагается мое видение проблем этих областей глазами участника работ.

### **Пневмоавтоматика**

В конце 50-х годов зарождалось новое направление в автоматизации дискретных производственных процессов, получившее название «пневмоавтоматика». Функционально дискретные системы пневмоавтоматики соответствовали электрическим релейным схемам, но в качестве рабочей среды в них использовался сжатый воздух. Это обеспечивало защиту от пожаров и взрывобезопасность (в потенциально опасных производствах), повышало надежность, упрощало диагностику неисправностей. Для машин с пневматическим приводом позволяло использовать один вид энергии для выполнения технологических операций и управления. По типу аппаратуры в пневмоавтоматике применялись три вида техники: мембранная, золотниковая, струйная (последнюю также называли пневмоникой). В Советском Союзе работы по пневмоавтоматике, особенно по струйной технике, опережали аналогичные работы за рубежом. Было получено несколько патентов в США и других западных странах. Из ведущих отечественных научных центров пневмоавтоматики на рубеже 50-х и 60-х следует назвать:

- Институт проблем управления (М.А. Айзерман – руководитель работы, группа А.А. Таля – мембранная техника, группа Л.А. Залманзона – струйная техника),
- Институт механизации в подмосковном городе Красноармейск (В.П. Зенченко),
- ЭНИМС (В.И. Щербаков, С.А. Юдицкий - золотниковая техника),
- НИИТЕПЛОПРИБОР (Ю.И. Островский, В.И. Левин – модификация мембранной техники).

В ЭНИМСе я занимался разработкой и апробированием инженерной методики построения систем управления машинами - автоматами (станки, кузнечнопрессовое и литейное оборудование, реакторы периодического действия и т.д.). Суть этой методики заключалась в следующем. Исходным документом являлось графическое описание последовательности работы исполнительных механизмов технологической машины в виде так называемой циклограммы. По циклограмме определялась временная диаграмма действия

сигналов от датчиков, контролирующих состояние исполнительных механизмов (а также другие параметры системы). Далее, на основе логических операций И, ИЛИ, НЕ, ПАМЯТЬ диаграмма датчиков преобразовывалась во временную диаграмму сигналов, управляющих исполнительными механизмами. Последняя корректировалась с учетом нештатных ситуаций и управления машиной в ручном режиме. На всех этапах методики обеспечивалась наглядность (визуализация) и возможность корректировки. Методика совместно с В.И. Щербаковым в 1960 г. была опубликована в журнале «Станки и инструмент» [1], и в 1961 г. перепечатана в английском техническом журнале [2]. В 1962 г. теми же авторами совместно с Л.М. Померанцевым (НИИ авиационной технологии) была опубликована монография [3].

Повышенный интерес к пневмоавтоматике в значительной мере был вызван созданием в 1959-61 гг. в Институте проблем управления (ИПУ) совместно с Московским заводом ТИЗПРИБОР Универсальной системы элементов промышленной пневмоавтоматики УСЭППА. Система представляла собой единый набор унифицированных элементов мембранной техники, на базе которых строились разнообразные управляющие устройства, как дискретные, так и аналоговые. Было организовано промышленное производство приборов на основе УСЭППА на заводе ТИЗПРИБОР. Идеологом и фактическим руководителем разработки и внедрения УСЭППА был Алексей Алексеевич Таль (1920 - 1995), в последующем доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией ИПУ, мой научный руководитель в аспирантуре. Создание УСЭППА в 1964 году было отмечено Ленинской премией.

В дальнейшем техника пневмоавтоматики подверглась модернизации: были совмещены в одном элементе мембранная и струйная компоненты (струйно-мембранная техника), элементы размещались на кассетах - стандартных печатных платах с унифицированными разъемами, кассеты помещались в стандартные шкафы. Завод ТИЗПРИБОР освоил выпуск комплекса ЦИКЛ на модернизированной пневматической технике, а на Московском заводе ПНЕВМОАППАРАТ запущено производство созданного при участии ИПУ модернизированного комплекса пневматических агрегатных средств КОМПАС.

Будучи аспирантом (1963 – 65 г.), а затем научным сотрудником ИПУ, я принимал активное участие во всех этих работах, с преимущественной направленностью на разработку эффективных методов графоаналитического описания функционирования технологических объектов управления и построения управляющих устройств на пневматической технике. В 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию по этой тематике, в 1968 г. вышла моя монография [4]. В 1968 г. мне поручили возглавить рабочую группу по проектированию и внедрению пневматических систем управления (Т.К. Берендс, Т.К. Ефремова, С. Зарифов, И.Р. Искра, А.А. Тагаевская). Группа работала весьма плодотворно по следующей технологии. Заказчик системы выделял инженера для участия в работе. Совместно с ним составлялось формализованное описание алгоритма функционирования технологической

машины и строилась принципиальная схема управляющего устройства на стандартных кассетах. Далее устройство собиралось на стенде, осуществлялись необходимые коммутации на клеммах кассет (настройка кассет и организация связей между ними), производилось тестирование устройства. Для устройства средней сложности (6 – 8 кассет) весь цикл составлял примерно одну – две недели. За 10 лет (1968-78) через лабораторию прошло больше сотни заказчиков. Кассеты для экспериментальных целей мы получали с завода. Эффективность при создании опытного образца управляющего устройства достигалась в большой степени благодаря принятому способу описания алгоритма (граф операций) и архитектуре управляющего устройства (позиционная структура). Но об этом подробнее в следующем разделе статьи.

Пневмоавтоматика применительно к машинам-автоматам просуществовала более 20 лет и «сошла», не выдержав конкуренции с компьютерами и программируемыми контроллерами. Однако наработанные в пневмоавтоматике методы описания и анализа алгоритмов управления системами инвариантны относительно техники, на которой реализуется управляющее устройство, и сохраняют свою актуальность и поныне.

### **Логическое управление дискретными процессами**

Дискретные процессы, реализуемые в объектах различной природы, состоят из множества целенаправленных действий – операций, выполняемых в некоторой последовательности. Переход от одних операций к другим происходит скачкообразно в дискретные моменты времени и зависит как от продолжительности предыдущих операций и полученных результатов при их выполнении, так и от воздействий внешней среды. Условия перехода между операциями отображаются логическими (булевыми) функциями от переменных, принимающих значения 1 и 0 (истина, ложь). Операции могут выполняться как последовательно, так и параллельно. Задача логического управления дискретными процессами заключается в обеспечении требуемой последовательности операций.

Эффективным и наглядным средством описания и анализа дискретных процессов служит математический аппарат сетей Петри, введенный в 1962 г. немецким математиком К. Петри и развитый в работах ряда ученых (М. Хак [5], Дж. Питерсон [6], В.Е. Котов [7], О.Л. Бандман [8] и др.). Сеть Петри изображается ориентированным графом с двумя типами вершин, где смежными могут быть только вершины разного типа (такие графы называют двудольными). Вершины именуют соответственно позициями (изображаются кружками) и переходами (изображаются планками). В позиции могут помещаться маркеры (фишки), вектор размещения которых по позициям определяет маркирование сети Петри в текущий дискретный момент времени. Для сети задается маркирование в начальный момент, а также финишные маркирования. Если во всех входных позициях перехода есть маркеры, и кроме того, выполняется соотнесенное переходу логическое условие, то переход срабатывает, в результате чего удаляются маркеры из его входных позиций и

вносятся маркеры в выходные позиции. Изменение маркирования сети Петри моделирует динамику дискретного процесса.

Модель дискретного процесса в виде сети Петри, позиции которой соответствуют операциям и помечены управляющими воздействиями на исполнительные органы системы, а переходы соответствуют событиям «Изменение состава выполняемых операций» и помечены логическими условиями, была названа графом операций. Дискретный процесс, моделируемый графом операций, должен удовлетворять ряду условий корректности, в том числе:

- любая операция может быть повторно начата только после своего завершения, т.е. исключается повторное инициирование операции во время ее выполнения;
- из любого маркирования, достижимого из начального, достижимо по меньшей мере одно финишное маркирование, т.е. исключаются зависания и циклы-ловушки, не имеющие выхода.

Анализ дискретных процессов по графу операций подробно рассматривался в монографии автора совместно с В.З. Магергутом [9]. Эта же тематика обсуждалась в моей докторской диссертации, защищенной в ИПУ в 1986 г.

Управляющие устройства на пневматических кассетах собирались непосредственно по графу операций по принципу позиционной структуры: каждой позиции графа сопоставлялась стандартная схемная ячейка, представляющая собой триггер с отдельными входами с предвключенной логикой И – ИЛИ на обоих входах. При построении современных систем логического управления дискретными процессами на электронной технике по графу операций составляется набор причинно-следственных выражений (продукций) вида:

$$\begin{aligned} & \text{ЕСЛИ } \langle \text{логическое условие} \rangle = 1, \\ & \text{ТО включить } \langle \text{список ИО} \rangle \text{ и выключить } \langle \text{список ИО} \rangle, \end{aligned}$$

где формулы логических условий содержат переменные, соотнесенные внешним и внутренним сигналам и операциям, ИО – исполнительные органы системы. Фактически, набор продукций является формальным описанием позиционной структуры. На основе этого набора программируется контроллер или компьютер.

### Моделирование сложных дискретных систем

В рамках моделирования сложных систем я занимался проблемами:

- разработки моделей и методов формализованного графоаналитического описания, а также анализа функционирования поточных систем обработки мобильных объектов [10];
- триадного моделирования функционирования дискретных систем [11, 12].

Ниже излагаются основные результаты, полученные в 1992-2012 г.г. при решении этих проблем.

### Поточные системы обработки мобильных объектов

Системами такого типа являются промышленные предприятия по выпуску продукции с несколькими переделами (машиностроение, металлургия и др.), ряд социальных систем, где правильнее говорить не об объектах обработки, а о субъектах, свойства (атрибуты) которых могут изменяться при прохождении через систему (например, лечебные учреждения), системы обслуживания заказов населения, и т.д. На вход системы поступают потоки необработанных объектов и потоки ресурсов, необходимых для обработки, на выходе формируются потоки обработанных объектов. Обработка производится с помощью множества операций, причем объекты могут передаваться с операции на операцию. В этом смысле объекты являются мобильными. Ресурсы системы распределяются между операциями. В ходе выполнения операции объект может проходить через несколько стадий, образующих его операционный жизненный цикл. Объектам разного типа могут соответствовать и разные жизненные циклы, являющиеся частными случаями (вариантами) общего операционного цикла. В рассматриваемой модели на операции могут одновременно обрабатываться несколько объектов, находящихся на разных стадиях своего жизненного цикла. Концептуально, операция является конкретизацией понятия «класс» в объектно-ориентированном подходе. Поэтому предлагаемый подход был назван операционно-классовым.

Была разработана методология двухуровневого операционно-классового подхода к моделированию поточных систем. На обоих уровнях модель представляет собой сеть Петри, где позиции соответствуют операциям (классам), а переходы – событиям перемещения мобильных объектов из класса в класс. Для каждого класса дается обобщенный граф операционного жизненного цикла для объектов, обрабатываемых в данном классе. На верхнем, абстрактном, уровне объекты не структурируются, т.е. не указываются их атрибуты. Объекты интерпретируются как маркеры, помещаемые в позиции сети Петри. Различие маршрутов на обобщенном графе жизненного цикла для объектов разного типа игнорируется, моделируется лишь количество объектов на различных стадиях цикла. Хотя модель верхнего уровня и является достаточно грубой, она позволяет частично проверять корректность исходных знаний о функционировании поточной системы и фильтровать ошибки, цена которых на последующих этапах создания системы была бы намного выше.

На нижнем, структурном, уровне моделирования вводятся атрибуты объектов и ресурсов. Для объектов выделяются атрибуты-идентификаторы, значения которых однозначно определяют каждый экземпляр объекта и сохраняются при перемещениях объекта внутри класса и между классами. При структурном моделировании отслеживаются маршруты объектов и динамика их атрибутов, а также расход ресурсов при реализации жизненного цикла каждой операции (пребывании объектов в классе). При переходах некоторые атрибуты могут удаляться и вводиться новые атрибуты («мутация» объектов). В результате структурного моделирования формируется так называемая

конвейерно-временная диаграмма, на которой показан путь каждого мобильного объекта с проекцией на временную ось.

Графоаналитический аппарат абстрактного и структурного моделирования в виде сетей Петри и помечающих их таблиц и логических функций от атрибутов, а также соответствующая методология с иллюстрацией на примерах даны в монографии [10].

### Триадное моделирование дискретных систем

В различных предметных областях широко применяются сетевые структуры, представляющие собой множество взаимодействующих автономных функциональных единиц – агентов. Среди факторов, определяющих поведение агента, первостепенными являются: **цели**, зависящие от внутренних ценностей, убеждений и приоритетов агента, а также от складывающейся внешней ситуации; **действия** (операции), направленные на достижение целей; **показатели**, отображающие ключевые параметры агента. Модель агента, выражающая единство и взаимосвязь этих трех факторов, названа триадной, а сетевая структура на базе триадных агентов – многоагентной триадной сетью.

Моделирование триадной сети предусматривает составление ее математического описания, проведение на его основе имитационных экспериментов с выявлением динамических характеристик сети (определение временных и ресурсных характеристик, конфликтных ситуаций, «узких мест» и т.д.) и прогнозированием развития сети на заданном временном горизонте.

Рассмотрим модели и методы формального описания (графового и алгебраического) триадных агентов и сетей. Начнем с определения целей.

*Целеполагание* заключается в выборе наиболее значимых целей системы и уровней их достижимости исходя из реальных ограничений на ресурсы. При этом последовательно выполняются следующие действия.

*Структурирование целей системы.* Выделяются главные цели, которые разлагаются на составляющие вплоть до получения элементарных (неразложимых) целей. Целевая структура изображается графом типа дерева, где корневая вершина соответствует главной цели, а вершины-листья соответствуют элементарным целям.

*«Взвешивание» элементарных целей* – оценивание их числовыми величинами (весами) и ранжирование производится методом анализа иерархий (метод Т. Саати). Дерево целей разбивается на фрагменты, состоящие из корневой вершины с заданным весом (вес главной цели равен 1) и непосредственно подчиненных ей целей, вес которых требуется определить. Для этого попарно сравниваются все подчиненные цели фрагмента, и эксперт оценивает упорядоченные пары. По результатам сравнения и оценки составляется система линейных уравнений, решение которой дает искомые веса подчиненных целей. Далее подчиненная цель, если она не элементарная, принимается за корневую в следующем фрагменте и т.д. Взвешивание начинают с фрагмента, содержащего главную цель.

*Минимизация числа элементарных целей* с учетом взаимовлияния целей и ограничения на суммарную степень достижимости удаляемых целей (определяется путем экспертной оценки по так называемой когнитивной карте);

*Классификация многоцелевых альтернатив.* Уровни достижимости элементарных целей из минимизированного множества устанавливаются экспертами и выражаются словесно и в виде числовых оценок. Множество всех возможных наборов уровней достижимости (пространство многоцелевых альтернатив) разбивается на непересекающиеся классы, из которых выбираются приемлемые исходя из состояния ресурсов. Классификация осуществляется методом О.И. Ларичева [13], сочетающим компьютерные процедуры с обращениями к экспертам и позволяющим существенно уменьшить число таких обращений.

*Определение в классе доминантной альтернативы* (все ее численные компоненты не меньше соответствующих компонент остальных альтернатив класса, но по меньшей мере одна строго больше) и среди доминантных альтернатив всех классов выбирается оптимальная (с максимальным значением интегрального показателя).

*Графодинамическая триадная модель агента* состоит из связанных между собой двудольных ориентированных графов, позиции которых сопоставлены соответственно целям, действиям и показателям. Позиции графа целей и графа действий описываются булевыми переменными (принимающими значения 0 и 1), графа показателей – арифметическими переменными, принимающими числовые значения в заданном диапазоне. Триадная модель агента определена на дискретной временной шкале с равными промежутками-тактами между заданными моментами наблюдения  $\tau = 0, 1, \dots, N$ . Предполагается, что любое событие в модели (внешнее воздействие, достижение целей, инициирование и завершение действий, «скачкообразное» изменение показателей) происходит только в моменты  $\tau$ , которые сопоставляются с переходами на графе действий. В этом смысле дискретная триадная модель является несколько «загрубленной». В реальных сетях события могут происходить и внутри тактов, что требует некоторой коррекции модели.

*Временной анализ агента* выполняется на основе непрерывно-дискретной модели, в которой действия отображаются на дискретной временной шкале, а показатели на непрерывной. Зависимость показателей от времени с учетом их взаимовлияния описывается многочленными функциями с областью определения на числовой оси. Переходы графа действий срабатывают в граничные моменты между тактами при совпадении трех условий: истечения заданной задержки от момента активирования перехода; наступления внутреннего события на временном интервале, определяемом многочленными функциями и логикой отношений на множестве показателей; наступления внешнего события на этом же интервале. Таким образом, проверяется результативность внешнего события – его влияние (или не влияние) на поведение агента.



## **Однородность и многоуровневость как расширение триадной структуры агента**

В первой версии триадной структуры управление изменением целей и действий являлось «дискретно-событийным» (выполнялось скачкообразно в моменты наступления определенных событий), а управление изменением показателей в соответствии с традициями когнитивного моделирования – «псевдонепрерывным» (управляющие воздействия подаются в каждый момент на горизонте моделирования и зависят от приращения входных показателей переходов графа в предыдущий момент). Такая модель является неоднородной, т.к. для графов целей и действий с одной стороны, и для графов показателей, с другой стороны, применяется разный понятийный и формальный аппарат. В работе вводится однородная триадная структура на основе единого дискретно-событийного аппарата. Агенты реальных сетей могут отличаться большой сложностью – состоять из сотен (и даже тысяч) компонентов, что затрудняет построение модели и ее анализ. Для преодоления барьера сложности традиционно используют иерархическое описание, в частности, на основе стандартов IDEF: описание нижестоящего уровня является детализацией («разверткой») некоторого элемента описания вышестоящего уровня. Недостатком такого подхода является трудность восприятия человеком «картины в целом». Для упрощения восприятия предложено расширение триадной структуры агента, заключающееся в ее многоуровневом линейном представлении с нисходящим расширением и уточнением знаний. Модель строится по «принципу линейки», где графы целей, действий и показателей нижестоящего уровня являются развертками соответствующих графов вышестоящего уровня, т.е. каждый уровень отображает всю систему.

*Модель конфигурации сети* определяется графом, позиции которого соответствуют агентам, а переходы – взаимодействиям между агентами. Взаимодействие заключается в том, что агент-отправитель, соответствующий входной позиции перехода графа конфигурации, передает некоторый ресурс агентам-получателям (выходным позициям перехода). Если ресурс является материальным или финансовым, то его запас у отправителя при взаимодействии уменьшается на соответствующую величину; если информационным, то база данных отправителя не изменяется.

## **Динамика развития сети на заданном временном горизонте моделирования**

Сеть отображается двухуровневой структурой, где верхний уровень образован графом конфигурации, нижний уровень – триадными моделями агентов. На горизонте моделирования выделяются моменты времени, в которые происходит преобразование графов модели сети, в общем случае на обоих ее уровнях (точки бифуркации). Имитационное моделирование процесса развития сети реализуется в форме диалога введенной модели с Системным архитектором (Лицом, Проводящим Моделирование - ЛПМ). На каждом временном интервале, следующем за моментом преобразования сети, ЛПМ контролирует функционирование модели и фиксирует полученные данные: о

достижении (или не достижении за нормативное время) целей, о тенденциях изменения показателей, о месте и времени нарушений, например, выходе показателей за допустимые пределы, об установлении в сети непредусмотренных циклов и т.д. ЛПМ анализирует эти данные и принимает решение о моменте следующего изменения модели и необходимых преобразованиях графов. Далее процедура повторяется для следующей точки бифуркации и т.д. Результатом имитационного моделирования сети  $S$  на горизонте  $[0, N]$  является цепочка моделей  $S(0), S(1), \dots, S(N)$ , где  $\tau = 0, 1, \dots, N$  – точки бифуркации на оси времени  $\tau$ .

### **Моделирование цикличности развития сетей**

Развитие в природе происходит циклически, частным случаем цикла является чередование периодов подъема (расцвета) и спада (увядания). Аналогичное имеет место в экономике и обществе, в том числе в организационных системах, где ведущую роль играет человек (государство и его институты, бизнес-системы, общественные организации). В «организационных сетях» агенты соответствуют подразделениям, которые в период подъема могут «развертываться» - дополнительно создаваться, расширяться, дублироваться с образованием филиалов, а в период спада, наоборот, «свертываться» - с частичной или полной ликвидацией, увольнением персонала и т.д. В условиях цикличности стабильность процессов развития возрастает при увеличении длительности циклов. Следовательно, при имитационном моделировании динамики организационных сетей оправдана постановка задачи поиска варианта развития с наиболее длинными циклами.

Для формирования периодов подъема и спада организационной сети вводится интегральный коэффициент жизнеспособности организации, определяемый по графу конфигурации сети. Коэффициент принимает лингвистические и балльные значения с фиксацией его верхней и нижней границы (лингвистические значения соответствуют словесным формулировкам типа «низкий, средний, высокий» и т.д., балльные значения представлены числами). При моделировании строится ступенчатый график изменения коэффициента жизнеспособности, где ступени соответствуют преобразованию графов конфигурации сети и/или графов агентов в точках бифуркации. Выход графика за верхнюю границу свидетельствует о завершении периода подъема (организация становится слишком сложной и плохо управляемой), а выход за нижнюю границу интерпретируется как кризис (снижение коммутативности и ослабление организации вплоть до прекращения ее существования). Проводятся имитационные эксперименты на моделях циклов с различными параметрами. По результатам экспериментов выбирается цикл максимальной длительности.

### **Алгебраическое описание структуры и поведения сетей**

Модель сети строится в два этапа. Вначале создается ее статическая составляющая, которая для каждого перехода задает входные и выходные позиции. Затем формируется динамическая составляющая модели путем

«нагружения» переходов продуктами (формулами типа ЕСЛИ→ТО). Статическая составляющая может быть представлена как в графовой, так и в алгебраической форме, с однозначным преобразованием из одной в другую. Графовая форма из-за своей наглядности удобна для сетей малой размерности. Для сложных сетей более эффективно алгебраическое описание в виде строки, составленной из чередующихся символов позиций и переходов и пронумерованных вертикальных стрелок. Длина строки линейно зависит от сложности сети. Такое представление, названное СЛОГ (Структурное Линейное Описание Графов), имеет и ряд других преимуществ: упрощает общение человека с компьютером, в частности ввод данных через клавиатуру, позволяет проводить равносильные преобразования сети, сокращает время компьютерных вычислений.

Для описания динамической составляющей модели сети введен язык индикаторных выражений, являющийся интеграцией продукционных формализмов и формализмов алгебры индикаторных логических формул. Язык обеспечивает:

- однородное описание механизма описания статической и динамической составляющих модели сети (принцип однородности);
- описание продукций в терминах переменных, соответствующих целям, действиям и показателям сети (принцип триадности);
- описание левой и правой части продукции (условия и действия) на основе индикаторных логических функций;
- описание механизмов взаимодействия агентов в сети путем синхронизации переходов в графах (слогах) агентов и передачи ресурсов от агента к агенту.

### **Триадные дорожные карты**

Дорожные карты представляют собой известный наглядный способ графической интерпретации процессов развития систем различного назначения на долгосрочную перспективу, отражающий различные пути достижения системой экспертно заданного конечного состояния. Разработка дорожных карт является в основном творческим процессом, их согласование и периодическую корректировку рекомендуется проводить в форме экспертных семинаров. В этой связи несомненный эффект дала бы алгоритмизация и последующая компьютеризация процесса построения и анализа дорожной карты с применением интерактивного имитационного моделирования на всех этапах ее жизненного цикла. Суть триадного моделирования заключается в следующем. Ключевыми параметрами процесса развития любой системы являются: цели, к достижению которых стремится развивающаяся система; действия, направленные на достижение целей; показатели, определяющие состояние системы. Параметры отображаются лингвистическо-балльными переменными, характеризующимися словесной и количественной оценкой. Цели, действия и показатели образуют три взаимодействующих уровня модели дорожной карты, где значения переменных, связи между ними, а также связи между уровнями и

связи системы с внешней средой могут изменяться при развитии системы. Каждый уровень моделируется индикаторной сетью – двудольным графом, дополненным продукционными выражениями типа «ЕСЛИ – ТО» на базе индикаторных логических формул (индикаторными выражениями). Совокупность трех упомянутых уровней образует динамическую модель «Триадная дорожная карта (ТДК)». Проводя имитационное моделирование ТДК на заданном временном интервале, получаем описание динамики целей, действий и показателей в дискретном времени.

Анализируемый временной горизонт процесса развития системы (горизонт прогнозирования) состоит из  $n \geq 1$  «участков стабильности», на которых изменяются только значения параметров, но остаются неизменными их состав и взаимосвязи. Другими словами, участок характеризуется фиксированной ТДК. Участки стабильности разделены критическими точками, определяемыми как моменты появления «предугрозы» недопустимого нарушения условий работы системы. В критических точках выполняется преобразование ТДК - изменение состава и/или взаимосвязей параметров путем операций над графами и корректировки индикаторных выражений.

Каждому участку стабильности на горизонте моделирования ставится в соответствие ТДК. При этом начальную карту задает ЛПМ. В ходе имитационного моделирования определяются критические точки, в которых ЛПМ трансформирует ТДК предыдущего участка в ТДК последующего участка стабильности. Таким образом, процесс развития в общем случае характеризуется  $(n - 1)$ -кратным изменением дорожной карты. Изменение по усмотрению ЛПМ производится на всех трех или лишь на некоторых уровнях карты и носит выборочный характер: выделяется фрагмент графового описания уровня, выделенный фрагмент «вырезается» и замещается другим фрагментом при сохранении преемственности в отношении остальной части графа уровня. Эта процедура подобна медицинской операции и потому названа «графохирургической» операцией

Триадное моделирование является интерактивным в том смысле, что оно выполняется в форме диалога между компьютером и ЛПМ: компьютер отслеживает функционирование (развитие) системы на участке стабильности и фиксирует появление критической точки («предугрозы»), ЛПМ на основе полученной информации принимает решение и корректирует ТДК.

В заключение статьи поясню смысл использованного в ее названии не очень распространенного словосочетания «инженерная наука». В технических приложениях применяют два стиля изложения материала: строго формальный, базирующийся исключительно на манипуляциях с математическими формулами, и содержательный, с широким использованием различных поясняющих графических конструкций и логическими рассуждениями на естественном языке (русском, английском и т.д.). Инженеру (специалисту с техническим образованием) по мнению автора понятнее второй, инженерный, стиль изложения. В этой связи, термин «инженерная наука» имеет право на

существование. Вместе с тем, следует стремиться к разумному сочетанию обоих стилей.

### Литература

1. Щербаков В. И., Юдицкий С. А. Проектирование систем пневмоавтоматики с пневматическим путевым контролем // Станки и инструмент. 1960. № 10.
2. Sherbakov V. I., Yuditskiy S. A. Design of Automatic Systems for Traverse Control // *Compressed Air and Hydraulus*. 1961. №6. №7.
3. Щербаков В. И., Померанцев Л. М., Юдицкий С. А. Пневмоавтоматика в машиностроении. М.: ЦИНТИМАШ, 1962.
4. Юдицкий С. А. Пневматические системы управления приводом машин-автоматов (методы построения). М.: 1968.
5. Hack M. *Decidability Questions for Petri Nets*. New York: Garland Publishing, Inc., 1979
6. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 264 с.
7. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 160 с.
8. Бандман О. Л. Проверка корректности сетевых протоколов с помощью сетей Петри // Автоматика и вычислительная техника. 1986. № 6. С. 82-91.
9. Юдицкий С. А., Магергут В. З. Логическое управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.
10. Юдицкий С. А. Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем. М.: Синтег, 2001. 112 с.
11. Юдицкий С. А. Моделирование динамики многоагентных триадных сетей. М.: Синтег, 2012. 112 с.
12. Юдицкий С. А. Триадно-сетевые дорожные карты развития систем // Управление большими системами. 2013. № 42.
13. Ларичев О. П. Наука и искусство принятия решений. М.: Наука, 1979. 200 с.

### References

1. Sherbakov V. I., Yuditskiy S. A. Design of Automatic Systems for Traverse Control. *Machines and Tooling*, 1960, no 10 (in Russia).
2. Sherbakov V. I., Yuditskiy S. A. Design of Automatic Systems for Traverse Control. *Compressed Air and Hydraulus*, 1961, vol 6, no 7.
3. Sherbakov V. I., Pomerantsev L. M., Yuditskiy S. A. *Pnevmoavtomatika v mashinostroenii* [Pneumatic Automation in Mechanical Engineering]. Moscow, Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut mashinostroeniia, 1962 (in Russia).
4. Yuditskiy S. A. *Pnevmaticheskie sistemy upravleniia privodom mashin-avtomatov (metody postroeniia)* [Pneumatic System Management by Actuator of Automatic Machine. Construction Method]. Moscow, 1968 (in Russia).
5. Hack M. *Decidability Questions for Petri Nets*. New York: Garland Publishing, Inc., 1979.

6. Peterson James L. *Petri net theory and the modeling of systems*. The University of Texas at Austin, 1981.
7. Kotov V. E. *Seti Petri* [Petri Nets]. Moscow, Nauka Publ, 1984, pp. 11-58 (in Russian).
8. Bandman O. L. Proverka korrektnosti setevykh protokolov s pomoshch'iu setei Petri [Validation of Network Protocols Using Petri Nets]. *Automatic Control and Computer Sciences*, 1986, vol. 6, pp. 82-91 (in Russian).
9. Iuditskii S. A., Magergut V. Z. *Logicheskoe upravlenie diskretnymi protsessami* [Logical Control of Discrete Processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987 (in Russian).
10. Iuditskii S. A. *Stsenarnyi podkhod k modelirovaniu povedeniia biznes-sistem* [Scenario Approach to Modelling for Business Systems]. Moscow, Sinteg Publ., 2001 (in Russian).
11. Iuditskii S. A. *Modelirovanie dinamiki mnogoagentnykh triadnykh setei* [Modeling the Dynamics of Multi-Agent Triadic Nets]. Moscow, Sinteg Publ., 2012 (in Russian).
12. Iuditskii S. A. The triadic-networked roadmaps for systems development. *Large-scale Systems Control*, 2013, vol 42 (in Russian).
13. Larichev O. P. *Nauka i iskusstvo priniatiia reshenii* [The Science and Art of Decision Making]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 200 p. (in Russian).

Статья поступила 22 июня 2015 г.

### Информация об авторе

*Юдицкий Семен Абрамович* - доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. Область научных интересов: моделирование организационно-технических систем. Тел. +7 495 339 59 10. E-mail: yuseab32@yandex.ru

Адрес: Россия, 117997, Москва ул. Профсоюзная, д. 65.

---

## Memories of Veteran Engineering: Pneumatics, Logical Control of Discrete Processes, Modeling Complex Discrete Systems

Iuditskii S. A.

Some issues of control are described in article. Pneumatics as a means of automation of production processes; logical control of discrete processes at the basis of the graph operations and standard positional patterns; modeling of complex systems using the formal apparatus of the indicator logic and triadic networks is considered on the example of a scientific biography of the author, covering more than half a century. Modeling of stream processing systems of mobile objects and triadic modeling of discrete systems are discussed in detail. Applied problem that can be successfully solved with the use of this scientific-methodical machines is shown by the author in the paper.

**Key words:** *Pneumatics, logic management, Petri nets, graph operations, positional structure, the in-line system with mobile objects, display logic, triad network, multi-agent system, process road map.*

### Information about Author

*Iuditskii Semen Abramovich* - Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor, Senior Research Officer. Institute of Control Sciences RAS. Field of research: modeling of organizational and technical systems. Tel.:+7 495 339 59 10. E-mail: [yuseab32@yandex.ru](mailto:yuseab32@yandex.ru)

Address: Russia, 117997, Moscow, Profsoyuznaya str., 65.