

УДК 004.82 + 004.891

*А. Д. Бахмут** **

*А. В. Крылов******

*П. А. Охтилев*** ***

*И. С. Кириллов*****

*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

**ОАО «НИО ЦИТ «Петрокомета»

***Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

****Министерство обороны РФ

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СЕТИ ПЕТРИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ СЛОЖНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ¹

В статье приведено обоснование использования G-модели для моделирования и проектирования систем анализа и управления сложными организационно-техническими системами.

Ключевые слова: модель, сеть Петри, система поддержки принятия решений, сложная организационно-техническая система, программирование в ограничениях, обобщенные вычислительные модели, G-модель.

*A. D. Bakhmut** **

*A. V. Krylov******

*P. A. Okhtilev*** ***

*I. S. Kirillov*****

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

** JSC "SRE CIT "Petrocometa"

***Saint-Petersburg Institute of Computer Science and Automation of the RAS

****Ministry of Defence

APPLICATION OF THE MODIFIED PETRI NET WITH THE OBJECTIVE OF AUTOMATED SUPPORT OF DECISION-MAKING CONTROL OF A COMPLEX ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEM

The article presents G-model for modeling system for complex organizational and technical system control and analysis.

Keywords: model, Petri net, decision support system, complex organization and technical system, constraint programming, computational models, G-model.

Проблему принятия решений или проблему выбора каждодневно и ежеминутно приходится решать, как отдельному индивидууму при поиске и выборе вариантов своего поведения, так и в масштабах отдельных государств и всего мирового сообщества при управлении соответствующими социально-экономическими и организационно-техническими комплексами и системами. При этом в связи со сложностью указанной проблемы, многообразием факторов, подлежащих учету, существенным повышением цены возможных ошибок в современных условиях резко возросло значение разработки

¹ Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ (№ № 15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139, 17-20-01214), госзадания Министерства образования и науки РФ № 2.3135.2017/К, в рамках бюджетных тем № № 0073–2014–0009, 0073–2015–0007, Международного проекта ERASMUS +, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-SBHE-JP, Новые стратегии обучения инженеров с использованием сред визуального моделирования и открытых учебных платформ.

научно обоснованного подхода к исследованию, развитию и созданию интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР).

Определим СППР как систему, выполняющую следующие функции [1]:

- оценка обстановки (ситуаций), выбор критериев и оценка их относительной важности;
- генерация возможных решений или сценариев действий;
- оценка сценариев, решений, действий и выбор наилучших из них;
- моделирование принимаемых решений при наличии такой возможности;
- динамический анализ возможных последствий принимаемых решений;
- сбор данных о результатах реализации принятых решений и оценка этих результатов.

В настоящее время активно ведутся исследования в области создания ИСППР при управлении сложными организационно-техническими системами. При этом усиливается их ориентация на решение слабоструктурируемых и неструктурируемых проблем, характеризующихся невозможностью использования методов и моделей, основанных на точном описании проблемных ситуаций [2, 11].

Под сложной организационно-технической системой (СОТС) будем понимать искусственную, самоорганизующуюся, динамическую, организационно-техническую совокупность взаимосвязанных элементов, предназначенных для управления как различными техническими средствами, так и личным составом объекта анализа [3, 8].

Одним из наиболее сложных классов задач поддержки принятия решений является планирование и оперативное управление именно СОТС. Ряд особенностей указанного класса задач вносит ряд трудностей при создании СППР:

- высокие требования к качеству и оперативности управления при наличии дефицита времени на выработку и принятие управляющих решений;
- большое число факторов, учитываемых в процессе принятия решений, которые сложно или невозможно корректно формализовать аналитически;
- неполнота, неточность, а, зачастую, недостаточная достоверность информации, на основе которой вырабатываются решения;
- изменение качества информации в процессе выработки решений;
- качественный характер описания ситуаций и управляющих решений;
- непостоянство состава управляемой системы;
- уникальность условий конкретных задач принятия решений;
- наличие качественной и стохастической неопределенности при описании результатов управляющих решений;
- необходимость учета последствий управляющих решений.

На сегодняшний день для выработки управляющих решений широкое распространение получили системы, использующие формализованный опыт и знания специалистов в соответствующих предметных областях, на основе продукционного логического вывода, фреймовых моделей, семантических сетей [2].

Исходя из функционального назначения ИСППР, а также из текущего состояния и перспектив развития информационных технологий, применимых при решении задач анализа СОТС, можно сформулировать следующую систему требований к базовому элементу целевой системы – модели представления знаний, используемой при анализе, оценивании и выработке решения [4]:

- обеспечение максимально простого и интуитивно понятного процесса приобретения и пополнения знаний о предметной области;
- смещение акцента внимания пользователя с разработки алгоритмов на разработку моделей;
- наличие возможности реализации структурного состояния максимально приближенного к реальному объекту анализа;
- наличие возможности объяснения знаний и выводов, сформированных в результате анализа входных данных;
- наличие возможности автоматизированной оценки целостности и полноты сформированной модели (знаний);
- обеспечение потокового процесса вычислений, асинхронно и децентрализованно;
- обеспечение получения результата анализа в условиях нечетких, недоопределенных, неполных входных данных.

Программирование в ограничениях

Таким образом, складывается необходимость в подходе, основанном на описании модели задачи, решаемой СОТС, или самой СОТС в целом, а не алгоритма ее решения. Одним из распространенных подходов решения проблемы в необходимом ключе является программирование в ограничениях, которое, в отличие от других известных в настоящее время видов программирования – императивного (C, Java и др.), логического (Prolog), функционального (LISP) и др., является по своей сути наиболее декларативным. Модель специфицируется в виде неупорядоченной совокупности отношений, которые соответствуют связям, существующим между параметрами задачи. Эти отношения, называемые общим термином «ограничения», могут иметь вид уравнений, неравенств, логических выражений, символьных (алфавитных) операторов и т.п. При этом постановка той или иной задачи конкретизируется путем добавления в модель ограничений на допустимые значения параметров и/или формулирования дополнительных связей между ними [4].

В модели нет априорного разделения параметров на входные и выходные. В соответствии с требованиями решаемой задачи, пользователь определяет, какие из параметров заданы точно, какие неизвестны совсем, а какие – приблизительно. Используя модель задачи и исходную информацию о значениях ее параметров, методы программирования в ограничениях обеспечивают автоматическое нахождение решения [4, 13].

В самом общем виде постановка задачи в парадигме программирования в ограничениях формулируется следующим образом. Пусть на переменные x_1, \dots, x_n , областями значений которых являются множества D_1, \dots, D_n , заданы ограничения $C_i(x_1, \dots, x_n)$, $i = 1, \dots, k$. Требуется найти наборы значений $\langle a_1, \dots, a_n \rangle$, $a_i \in X_i$, которые удовлетворяют всем ограничениям одновременно.

Соответственно задача удовлетворения ограничений — это кортеж

$$CSP = \langle X, D, C \rangle,$$

где $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множество переменных; $D = \{D_1, \dots, D_n\}$ – множество доменов, каждый домен – конечное множество, содержащее возможные значения, соответствующей переменной; $C = \{C_1, \dots, C_n\}$ – множество ограничений.

Ограничение C – отношение, определенное на подмножестве значений всех переменных, $C_i \subseteq D_1 \times \dots \times D_n$, $C_i \subseteq D_1 \times \dots \times D_n$.

Существует два основных подхода к решению задач удовлетворения ограничений. Первый – полный перебор решений. При этом перебор можно представить как обход дерева поиска в глубину, а путь до каждого листового узла описывается одним кортежем значений переменных [13]. Следует отметить две особенности такого подхода:

- если решение есть, то оно будет найдено;
- экспоненциальная сложность, вследствие чего задача слабо решается без специальных методов ускорения перебора.

Второй подход – метод локального поиска. Выбор преемника текущего состояния задачи поиска зависит только от самого этого состояния [13]. Преимущества такого подхода:

- сравнительно низкая вычислительная сложность относительно числа переменных;
- при незначительном изменении условий уже решенной задачи можно использовать полученное для нее решение в качестве отправной точки для поиска новых решений;
- легкость в распараллеливании в большинстве случаев.

Увы, но решение может и не быть найдено, даже при его наличии, или найдено лишь локальное решение, но не оптимальное.

Примерами являются генетические алгоритмы, алгоритмы лучевого поиска, алгоритмы роевого интеллекта (муравьиный, пчелиный, метод роя частиц), стохастические методы (имитация отжига).

Обобщенные вычислительные модели

Одним из наиболее развитых отечественных подходов, относящихся к программированию в ограничениях, является технология недоопределенных моделей (Н-моделей) или, как наиболее общий случай – обобщенных вычислительных моделей [4].

Соответственно ОВМ можно выразить как кортеж:

$$M = (V, W, C, R),$$

где V – множество объектов из заданной ПРО; R – множество ограничений на значения объектов из V ; W – множество функций присваивания; C – множество функций проверки корректности.

Каждому объекту $v \in V$ сопоставлены:

- общность предметной области X_v ;
- начальное значение из X_v (точное, недоопределенное или полностью неопределенное);
- функция присваивания W_v ;
- функция проверки корректности C_v .

Функция присваивания – это двухместная функция, работающая при каждой попытке присваивания очередного значения объекту $v \in V$ и определяющая новое значение объекта как функцию от текущего и присваиваемого значения. Функция проверки корректности – это унарный предикат, который выполняется в случае, если значение объекта анализа изменилось, и проверяет правильность этого нового значения. Ограничения из R должны быть функционально интерпретируемы.

На уровне интерпретации ОВМ обычно представляется двудольным ориентированным графом (ОВМ-сетью), в котором выделены два типа вершин: объекты (данные) и функции (процессы обработки данных). Дуги связывают объектные и функциональные вершины. Входящие в вершину-функцию дуги соотносят с ней объекты, которые выступают в качестве входных аргументов для функции, исходящие – указывают на объекты, в которые должна производиться запись вырабатываемых функцией результатов [5].

Процесс вычислений на ОВМ имеет потоковый характер – изменение объектных вершин сети активизирует (вызывает к исполнению) функциональные вершины, для которых эти объектные вершины являются входными аргументами, а исполнение функциональных вершин, в свою очередь, может вызывать изменение результирующих объектных вершин. Вычисления заканчиваются тогда, когда-либо не остается активных функциональных вершин (УСПЕХ), либо функция проверки корректности вырабатывает значение «ложь» (НЕУДАЧА).

Сеть Петри

Естественно, важно отразить не только закономерности функционирования, но и структурные характеристики системы. Очевидно, что для выявления конструктивных (структурных) закономерностей системы необходимо добиться максимальной визуальной выразительности. Поэтому для дальнейших исследований в качестве базовой модели был выбран один из графоориентированных инструментов моделирования: сети Петри (СП) [6].

СП представляет из себя двудольный ориентированный размеченный мультиграф, аналитически задаваемый кортежем следующего вида [7, 10]:

$$C = \langle P, T, I, O \rangle,$$

где $P = \{p_1, p_1, \dots, p_n\}$ – конечное множество позиций, $n \geq 0$; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – конечное множество переходов, $m \geq 0$, $P \cap T = \emptyset$; $I: T \rightarrow P^\infty$ – входная функция – отображение из переходов в комплекты позиций; $O: T \rightarrow P^\infty$ – выходная функция.

Дугами могут соединяться только вершины различных типов. Для описания динамики процессов, реализуемых в СП, дополнительно вводится понятие метки. Размещение меток по позициям называется ее маркировкой. Перемещения меток по сети представляют собой совокупность срабатываний переходов и отображают смену дискретного состояния моделируемой системы. Срабатывание перехода возможно, если имеется соответствующее переходу событие (т.н. предусловие). Выполнение события представляется фишкой в позиции, соответствующей этому условию. При запуске (срабатывании) перехода из входных позиций (предусловий) удаляются фишки, в выходных позициях (постусловиях) фишки заносятся [10].

Применение СП часто обусловлено необходимостью моделирования асинхронных параллельных процессов, к которым можно отнести и процесс своевременного управленческого реагирования на слабые сигналы о возможном отклонении от нормального уровня функционирования моделируемой системы.

Основными достоинствами данного теоретического аппарата считаются наглядность представления процессов, возможность упорядочения потока информации, учет причинно-следственных взаимосвязей событий. СП могут быть использованы для моделирования практически любой сложной системы.

Есть два основных подхода практического применения СП при проектировании и анализе системы. В одном СП рассматривается как вспомогательный инструмент анализа. Вначале система проектируется стандартными методами, затем построенная система моделируется СП и далее анализируется. Любые проблемы, выявленные при анализе, исправляются. Система модернизируется, снова моделируется и анализируется. Этот цикл повторяется пока анализ не будет завершен успешно (рис. 1).

Более эффективным и радикальным видится другой метод, в котором весь процесс проектирования и определения характеристик проводится сразу в терминах СП. Методы анализа применяются только для создания проекта, свободного от ошибок.

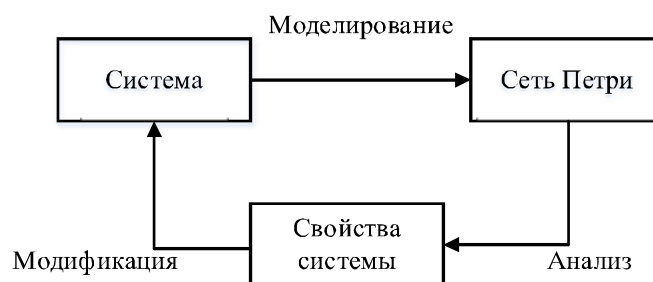


Рис. 1. Использование сетей Петри для моделирования и анализа системы

СП – признанный инструмент моделирования и функционального анализа параллельных и распределенных вычислительных систем и процессов. СП позволяют естественно описывать синхронизацию, параллелизм, конфликт и причинную зависимость, а также наглядно представлять структуру и поведение систем, что делает их отличным потенциальным инструментом для разработки ИСППР.

Графическими примитивами показывается течение процесса, а конструкциями специального языка имитируется необходимая обработка данных [6].

Существенным недостатком как классических СП, так и многих модификаций СП является отсутствие учета фактора времени. Это не позволяет эффективно моделировать те реальные процессы, в которых от текущего времени зависит состояние анализируемой системы. Важность наличия средств представления времени и темпоральных зависимостей в интеллектуальных системах бесспорна, особенно в наши дни [6].

G-модель

Следуя основным принципам построения МПЗ, описанным выше, декларативная модель знаний может быть представлена как семантическая сеть, вершинами которой являются объекты и понятия предметной области, а дуги характеризуют отношения между ними. В связи с этим можно на множестве параметров, характеризующих состояния исследуемого объекта, определить отношения, связывающие эти параметры. Это позволяет определить G-модель как модификацию ОВМ.

Вычислительной G-моделью (или просто G-моделью), полностью задающей модель некоторой ПРО, будем называть кортеж [4]:

$$M_G = \langle X, R_M, P_M, \Delta_M \rangle,$$

где $X = \{x_i | i = 1, \dots, n\}$ – конечное множество переменных (параметров), характеризующих явления (процессы) из ПРО. Природа каждого из параметров, входящих в X , может иметь произвольную природу, поддающуюся наблюдению; R_M – конечное множество отношений на множестве параметров из X ; P_M – конечное множество предикатов, предметными переменными в которых являются элементы из X ; Δ_M – отображение $R_M \rightarrow P_M$, ставящее в соответствие каждому отношению из R_M элемент из P_M .

G-модель является одной из разновидностей семантических сетей и сетей Петри. В связи с этим к ней применимы операции, выполнимые на семантических сетях. Графически G-модели можно представить операторной схемой и просто схемой соответствующей G-модели.

Исходя из идеи графического представления, G-модель можно выразить и как следующий кортеж:

$$M_G = \langle X, \Phi_M, \Phi_M^P, \Delta_M \rangle,$$

где X – описанное выше конечное множество переменных (параметров); Φ_M – множество операторов схем; Φ_M^P – множество условий применимости операторов; Δ_M – отношение задающее соответствие между элементами множества отношений R_M и множества предикатов P_M , другими выражение связи операторов из Φ_M и условиями их применимости из Φ_M^P , $\Delta_M: \Phi_M \rightarrow \Phi_M^P$.

Операторной схемой G-модели называется двудольный ориентированный граф, вершинами которого являются (рис. 2):

- вершины-операторы $\phi_i \in \Phi_M$;
- вершины-параметры из набора переменных связанных отношениями $r, r \in R_M$.

Причем дуги направлены от вершин – входных параметров к вершинам – выходным параметрам для всех вершин-операторов.

Операторная схема несет в себе информацию о структуре G-модели, показывая, какие параметры могут быть вычислены по заданному набору параметров и в какой последовательности.

Соотнося с СП можно выделить явное сходство вершин-параметров с позициями СП, а вершин-операторов с переходами СП.

Просто схемой G-модели называется гомоморфный образ его операторной схемы такой, что (рис. 3):

- вершина-оператор является единственной, представляющей всю G-модель;
- входными вершинами-параметрами являются только те, которые также являются входными в операторной схеме соответствующей G-модели;
- выходными вершинами-параметрами – все остальные вершины-параметры из операторной схемы, как выходные, так и промежуточные.

Схема отношений предоставляет информацию о параметрах, которые могут быть в конечном итоге вычислены в данной G-модели.

Рассмотрим вначале для наглядности простые G-модели.

Простой G-моделью назовем такую M_G , у которой отсутствуют условия применения (срабатывания) операторов, т.е. $P_M = \{\emptyset\}$, а значит, и $\Delta_M = \{\emptyset\}$.

В качестве примера рассмотрим G-модель M_G , $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$, $\Phi_M = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 | \varphi_1: x_1 \rightarrow x_2; \varphi_2: x_2 \rightarrow x_3; \varphi_3: x_1 \times x_4 \rightarrow x_3 \times x_4\}$, операторная схема которой приведена на рис. 2, а схема на рис. 3.

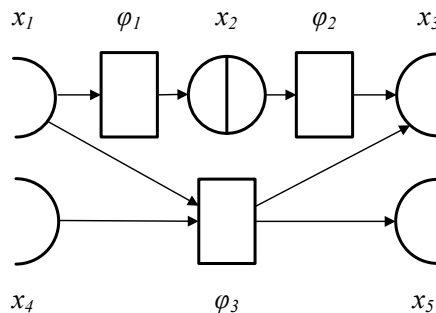


Рис. 2. Операторная схема для G-модели M_G

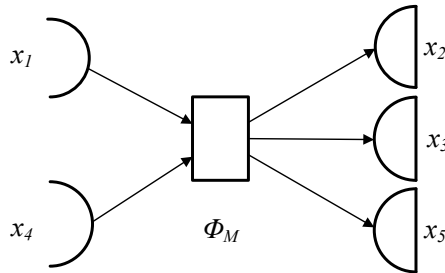


Рис. 3. Схема G-модели M_G

Для графического представления полнофункциональных G-моделей необходимо так же определить управляющие вершины операторных схем. Каждая такая вершина соответствует $p \in P_M$ множества P_M (или оператору $\varphi \in \Phi_M^P$ из альтернативного представления). Входные дуги в эту вершину направлены от вершин-параметров, которые используются в качестве предметных переменных соответствующего оператора. Выходные дуги направлены к вершинам-операторам, для которых установлено условие применимости.

Если установить условие применимости оператора φ_3 в модели M_G посредством предиката $p_1(x_1, x_4)$ в виде условного оператора $\varphi_3^p(x_1, x_4)$, то операторная схема примет вид, изображенный на рис. 4.

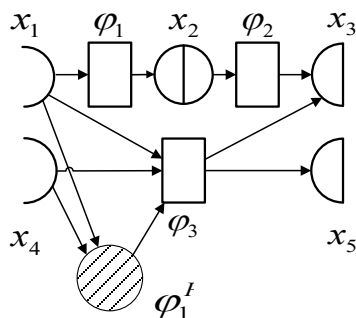


Рис. 4. Операторная схема M_G с управляющей вершиной

Выводы

G-модель представляется вариацией продукционно-фреймовой МПЗ, воплощая в себе простоту представления знаний и организации логического вывода продукционных моделей с широтой возможностей описания объектов и моделей фреймовых сетей.

G-модель позволяет не только практически реализовать поточность ОВМ и параллельную обработку входных данных в режиме реального времени, тем самым нивелировав одни из недостатков сетей Петри, но и, благодаря своим изобразительным свойствам, формально описать практически любые МПЗ, а значит и широчайший спектр задач анализа и обработки данных. И практический опыт применения наглядно это демонстрирует [12].

Произвольный характер переменных, операторов и условных операторов дает возможность реализовать широкий спектр теорий, позволяющих действовать в условиях неполноты, неточности, недостаточной достоверности.

Библиографический список

1. Трахтенгерц, Э.А. Компьютерные системы поддержки принятия управленческих решений / Э.А. Трахтенгерц // Проблемы управления. 2003, № 1. С. 13-28
2. Борисов, В.В. Реализация ситуационного подхода на основе нечеткой иерархической ситуационно-событийной сети / В.В. Борисов, М.М. Зернов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 1. С. 17-30.
3. Волков, В.Ф., Галанкин А.В., Федер А.Л. Общая характеристика процесса автоматизированного управления сложными организационно-техническими системами специального назначения Воздушно-космических сил / В.Ф. Волков, А.В. Галанкин, А.Л. Федер // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7. № 6. С. 50-54.
4. Охтилев, М.Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа/М.Ю. Охтилев. СПб.: ВИКУ им. А.Ф.Можаевского. 1999. 161 с.
5. Зуенко, А.А. Управление ограничениями при концептуальном моделировании сложных организационно-технических систем: контекстный подход / А.А. Зуенко, А.Я. Фридман // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013, Т.12. № 1, С. 79-84.
6. Еремеев, А. П. Темпоральные сети Петри и их применение в интеллектуальных системах поддержки принятия решений реального времени / А.П. Еремеев, Ю.И. Королев // Программные продукты и системы. 2013. Т.2. № 4. С. 336-344.
7. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 264 с.
8. Корнаков, А.Н. Модель сложной организационно-технической системы / А.Н. Корнаков // Перспективы науки и образования. 2015. № 2. С. 44-50.
9. Актуальные научно-технические проблемы разработки и внедрения взаимосвязанного комплекса унифицированных интегрированных систем поддержки принятия решений (СППР) в АСУ объектами военно-государственного управления / П.Н. Автомонов, М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3(152). Таганрог: Технологический институт Южного федерального университета, 2014. С.14–26.
10. Зубова, Т.Н. Использование сетей Петри для моделирования процесса принятия управленческих решений / Т.Н. Зубова, Б.Ф. Мельников // Вектор науки ТГУ. 2011. № 3(17). С. 33-37.
11. Курейчик, В.М. Особенности построения систем поддержки принятия решений / В.М. Курейчик // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7. С. 92–98.
12. Теория и практика построения автоматизированных систем мониторинга технического состояния космических средств. / О.В. Майданович, М.Ю. Охтилев, В.А. Каргин и др. Под ред. О. В. Майдановича СПб.: ВКА, 2011.
13. Зуенко, А. А. Программирование в ограничениях на языке python с применением структур и алгоритмов алгебры кортежей /А.А. Зуенко, А.А. Алмаматов // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 5(24). С. 158-170.
14. Нарирьяни, А.С. Модель или алгоритм: новая парадигма информационной технологии / А.С. Нарирьяни // Информационные технологии. 1997. № 4. С. 11–16.