

Семенистый Владимир Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: vlad60sem@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282135206; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Гамолина Ирина Эдуардовна – e-mail: iegamolina@sfedu.ru; тел.: 89185190837; кафедра высшей математики; к.т.н.; доцент.

Semenisty Vladimir Vasil'evich – Southern Federal University; e-mail: vlad60sem@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282135206; the department of higher mathematics; cand. of phys.-math. sc.; associate professor.

Gamolina Irina Eduardovna – e-mail: iegamolina@sfedu.ru; phone: +79185190837; the department of higher mathematics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.4(519.766)

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-189-201

О.И. Атакищев, В.Г. Грибулин, В.Е. Ананьев, Е.А. Титенко

РЕКОНФИГУРАЦИОННЫЕ МЕТАГРАММАТИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОЭТАПНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ АТАК

Цель исследования определяется существенным расширением классов угроз современным автоматизированным системам, динамичным развитием тактик и техник атак на их информационные ресурсы. Имеющиеся методы и аппаратно-программные средства эффективно противостоят одноэтапным атакам, имеющим фиксированную схему деструктивного воздействия и ограниченную во времени активность. Современные типы деструктивных воздействий понимаются как многоэтапные комплексные атаки, для которых актуально создание адекватного и эффективного аппарата описания, моделирования и отражения новых типов атак. Методы исследования основаны на развитии структурно-алгебраического подхода, в первую очередь – аппарата формальных грамматик и метаграмматик. Установлено, что известные формальные модели для описания и моделирования многоэтапных комплексных атак получаются громоздкими, затруднена их модификация. Большинство дескрипторов атак не оснащены представительным набором методов структурного и алгебраического анализа подобных сложно структурированных объектов. Для описания, моделирования и отражения таких атак разработан класс реконфигурационных метаграмматик. Эти метаграмматики содержат набор обычных и реконфигурационных правил согласования между элементами грамматик в составе грамматики. Данные правила позволяют выбирать в зависимости от достигнутых состояний синтаксического анализа конкретные ветви графа поиска. Это свойство существенно сокращает пространство перебора и повышает тем самым удельную эффективность поиска. Разработанный аппарат реконфигурационных метаграмматик создает необходимый теоретический базис для их эффективного использования при моделировании и отражении существующих и перспективных МКА, имеющих структурно-лингвистическое описание. Полученная в результате квалитметрическая пятимерная диаграмма, построенная на набору практически значимых показателей (однородность, связность, компактность, адаптивность, направленность) показала преимущество реконфигурационных метаграмматик перед метаграмматиками общего вида. Методы синтаксического анализа в реконфигурационных метаграмматиках отличаются структурными правилами реконфигурации (структурной адаптации) и критериями выбора при их адаптации. Эти процедурные особенности позволяют расширить возможности моделирования атак и повысить эффективность процедур отражения многоэтапных комплексных атак.

Моделирование; иерархический грамматический разбор; структурная адаптация; реконфигурационное правило согласования.

O.I. Atakischev, V.G. Gribunin, V.E. Ananiev E.A. Titenko

RECONFIGURATION METAGRAMMATICS FOR DESCRIPTION AND MODELING OF MULTI-STAGE COMPLEX ATTACKS

The purpose of the study is determined by a significant expansion of the classes of threats to modern automated systems, the dynamic development of tactics and techniques for attacking their information resources. The available methods and hardware and software tools effectively resist single-stage attacks that have a fixed scheme of destructive impact and time-limited activity. Modern types of destructive influences are understood as multi-stage complex attacks, for which it is important to create an adequate and effective apparatus for describing, modeling and repelling new types of attacks. Research methods are based on the development of a structural-algebraic approach, primarily on the apparatus of formal grammars and metagrammars. It has been established that the well-known formal models for describing and modeling multi-stage complex attacks are cumbersome, and their modification is difficult. Most attack descriptors are not equipped with a representative set of methods for structural and algebraic analysis of such complexly structured objects. To describe, model and repel such attacks, a class of reconfiguration metagrammars has been developed. These metagrammars contain a set of regular and reconfiguration rules for matching between grammar elements within the grammar. These rules allow you to select specific branches of the search graph depending on the achieved parsing states. This property significantly reduces the search space and thus increases the specific efficiency of the search. The developed apparatus of reconfiguration metagrammars creates the necessary theoretical basis for their effective use in modeling and reflecting existing and prospective ICAs that have a structural-linguistic description. The resulting qualimetric five-dimensional diagram, built on a set of practically significant indicators (homogeneity, connectivity, compactness, adaptability, directionality) showed the advantage of reconfiguration metagrammars over general metagrammars. Methods of parsing in reconfiguration metagrammars differ in structural rules of reconfiguration (structural adaptation) and selection criteria for their adaptation. These procedural features make it possible to expand the possibilities of attack modeling and improve the efficiency of procedures for repelling multi-stage complex attacks.

Modeling; hierarchical parsing; structural adaptation; reconfiguration-matching rule.

Введение. Современный этап развития автоматизированных систем (АС) различного назначения в РФ и зарубежных странах характеризуется существенным расширением множеств угроз их информационной безопасности (ИБ) [1]. В первую очередь это связано с повышением роли самих АС при решении современных задач управления реальным уровнем сложности, информационно-аналитических задач сбора, актуализации, концентрации информации геополитического, жизнеобеспечивающего, специального характера, способной дестабилизировать работу органов государственной власти различных уровней, объектов критической инфраструктуры (газоснабжение, энергетика, объекты водного хозяйства и др.) силами недружественных стран, криминальных структур, отдельных хакеров и хакерских группировок. Главная особенность - существенное расширение классов угроз современным АС, динамичное развитие тактик и техник атак на их ресурсы. Переход систем и аппаратно-программных средств деструктивного воздействия от одиночных или периодических атак к непрерывным комбинированным сценариям определяет необходимость создания адекватных средств защиты от угроз, выявления уязвимостей и противостояния комплексу атак различных типов.

Также существенное усложнение АС различных классов создает дополнительные угрозы их информационной безопасности, потенциально увеличивает возможности внешних и внутренних нарушителей по реализации данных угроз, в том числе путем проведения многоэтапных атак, носящих комплексный характер по форме и характеру проведения. В большинстве случаев такие комплексы атак характеризуются комбинаторной реализацией числа и типов таких этапов как раз-

ведка (мониторинг), маскировка входа/выхода, передача похищенной информации и данных о функционировании АС в защищенном и замаскированном режиме, комплексного проактивного воздействия на разнородные информационные и телекоммуникационные ресурсы различных контуров АС и т.п. Большое число подобных этапов и элементов атак систематизировано в рамках модели (матрицы) MITRE ATT&CK [1], которая постоянно расширяется, отражает особенности реализации новых классов реальных многоэтапных атак.

Все это определяет необходимость решения задач ИБ АС на новом уровне, в том числе и учитывающем характер современных многоэтапных комплексных атак (МКА).

Проведенный анализ современных механизмов парирования угроз (отражения атак) ИБ АС показал следующее.

При создании систем ИБ современных АС реализуются передовые механизмы (методы) и технологии защиты информации, эффективно противостоящие одноэтапным атакам, имеющим фиксированную схему деструктивного воздействия и ограниченную во времени активность. На смену пространственно-временной локализации атак на ресурсы АС пришла непрерывно функционирующая противоборствующая информационно-разведывательная среда, анализирующая условия возникновения деструктивных процессов и генерирующая систему атак, имеющих иерархию и изменяемую прагматику исполнения. В этом контексте многоэтапные комплексные атаки (МКА) отличаются реконфигурацией, направленной на управляемую адаптацию структуры и модификацию параметров, что позволяет учитывать опыт МКА и новые сочетания параметров.

В связи с этим системы ИБ современных АС не в полной степени отвечают перспективным требованиям по адаптации к структурам перспективных МКА. Системы ИБ не позволяют оперативно управлять выбором стратегий и конкретных алгоритмов (тактик и схем) отражения комплексных многоэтапных адаптивных (реконфигурируемых) атак на ресурсы АС ВН. В большинстве случаев не удается реализовать общую стратегию адаптивного подхода к отражению подобных сложно структурированных атак, основанную, в первую очередь, на ситуационном сочетании частных стратегий и алгоритмов, со структурным дообучением в процессе функционирования систем и средств защиты информации АС.

Реализация перспективных механизмов (методов, методик) отражения современных комплексных атак, требует создания адекватного методического аппарата их отражения с адаптивной структурной подстройкой под реализуемые в атаках многоэтапные сложно структурированные процедуры.

Это позволит преодолеть объективное противоречие между возросшими требованиями к результативности отражения появившихся в последние годы классов многоэтапных комплексных атак и возможностями существующего методического аппарата по их отражению.

Постановка задачи. Исследование состояния вопроса по созданию подобных адаптивных механизмов и средств отражения МКА показало, что разработку для них методического аппарата и создание технических средств в последние годы предложено осуществлять в рамках достаточно представительного класса подходов, ориентированных на применение различных моделей описания вариантов тактик и техник МКА, а также стратегий и алгоритмов их отражения. Применительно к МКА выделяются следующие подходы [2]:

- ◆ алгебраические;
- ◆ статистические;
- ◆ адаптивные;
- ◆ поисковые;
- ◆ структурно-лингвистические.

Сводная табл. 1 отражает основные особенности данных подходов применительно к МКА.

Таблица 1

Особенности подходов анализа и оценки МКА

Подходы	Особенности	Показатели					
		Сложность расчета	Модульность	Иерархия	Предобработка	Имперфективная инф-ция	Параллелизм
Алгебраический	Базовые процессы и атаки описываются системой уравнений с параметрами	высокая	-	-	+	-	высокий
Статистический	Описание атак законами распределения случайных величин	средняя	-	-	-	-	средний
Поисковый	Формализация пространства поиска. Четкие критерии перебора	средняя	+	-	+	-	высокий
Адаптивный	Изменяемые веса, устойчивость к зашумлению, возможность обучения	высокая	-	-	+	+	средний
Структурно-алгебраический	Описание атак в виде сложно структурированных дескрипторов	средняя	+	+	+	+	высокий

Проведенный анализ предложенных к настоящему времени методов и методик применительно к решению задач отражения МКА в рамках структурно-алгебраического подхода показал также, что наиболее перспективным является создание и использование новых классов метаграмматик и ориентированных на них методов синтаксического анализа для учета специфики решаемых прикладных задач в области ИБ АС повышенной структурной сложности.

В рамках данных подходов атака понимается и описывается как некий объект-дескриптор, имеющий преимущественно локальные признаки и частные свойства. Тем не менее рассмотрение МКА предписывает в моделях и методах ориентироваться на характеристики иерархичности, компактности описания, структурной наращиваемости, потенциального параллелизма данных, интеграции с моделями обработки знаний, что позволяет рассматривать описание и реализацию атак как активную систему, имеющую целенаправленное изменяемое во времени поведение.

Перечисленные свойства в полной мере присутствуют в структурно-алгебраическом подходе [3–16], основной особенностью которого является использование подклассов атрибутивных формальных грамматик и грамматических систем (в первую очередь-метаграмматик) для формального описания множеств правил формирования стратегий и алгоритмов (тактик и техник) реализации МКА, их параметров, а также методов полного и неполного синтаксического анализа в качестве процедурной основы адаптивных стратегий, методов и методик отражения МКА.

Метод решения. Применительно к решению задач отражения МКА, особенности данного подхода в известных работах не рассматривались, в его рамках не разработаны метаграмматические модели и методы синтаксического анализа, учитывающие структурно-параметрические особенности отражения МКА, в целом, не разработаны методики отражения различных классов МКА, позволяющие эффективно решать прикладные задачи в рассматриваемой области исследований.

В целом, проведенный анализ показал, что при проведении перспективных исследований в данной прикладной области первоочередному решению подлежит достаточно широкий круг задач, связанных с созданием структурно-алгебраических моделей рассматриваемых сложно структурированных МКА. Данные модели должны отражать большинство структурных, и алгебраических особенностей многоэтапных комплексных процедур атак, динамику их структурно-параметрической адаптации под конкретные действия систем ИБ АС [2–4].

Также проведенный анализ известных подходов и методов решения задач формального описания (моделирования) МКА показал, что в рамках существующих формальных схем практически невозможно специфицировать все основные синтаксические (признаковые), структурные, параметрические, стохастические и семантические (а также другие экстралингвистические) отношения, свойственные основным классам МКА на ресурсы АС [2–12].

Известные формальные модели получаются громоздкими, затруднена их разработка и модификация, большинство языков описания (моделирования) правил формирования МКА не оснащены достаточно представительным набором методов структурного (в первую очередь синтаксического) и алгебраического анализа подобных сложно структурированных атак.

Преодоление этих недостатков при решении рассматриваемого класса задач возможно при дальнейшем развитии аппарата метаграмматик в рамках создания их нового класса – реконфигурационных метаграмматик (РМГ), создающих формальный базис решения представительного класса задач в рассматриваемой прикладной области исследований.

В данной статье приводятся основные результаты создания и развития формального аппарата РМГ и особенности его практического применения для решения рассматриваемого класса задач.

В основу предлагаемого подхода к моделированию МКА положено понятие РМГ, которую определим как формальную систему следующего вида.

Определение 1. Реконфигурационная МГ представляет собой систему-тройку

$$G_{PMG} = \langle \{ G_{ia} \}, G_P, W_{AP} \rangle, \quad (1)$$

где $\{ G_{ia} \}$ – множество атрибутивных грамматик определенного вида, $i=0...3$;

G_P – реконфигурационная грамматика, входящая в МГ,

W_{AP} – реконфигурационная схема метаграмматики, содержащая набор обычных [1–5] и реконфигурационных правил согласования (определенного рода отображений, задающих условия переходов между атрибутивными грамматиками) между элементами грамматик, входящих в РМГ.

Реконфигурационные правила согласования определяют отображения элементов G_p и продукциями (метками продукций) $\{G_{ia}\}$. Данные правила позволяют выбирать в зависимости от достигнутых состояний синтаксического анализа G_p в РМГ, конкретные ветви разбора или их модификации для соответствующих грамматик $\{G_{ia}\}$. Это свойство РМГ существенно сокращает пространство перебора, определяя G_p совершать только необходимые или близкие к ним шаги грамматического разбора и тем самым повышая удельную эффективность поиска (синтаксического анализа). Введение реконфигурационных правил согласования определяет новизну заявленной системы-тройки – реконфигурационной МГ.

Таким образом, РМГ представляет собой систему взаимосвязанных грамматик, в которой обычные правила согласования задают взаимосвязи между элементами $\{G_{ia}\}$, аналогично [2], а реконфигурационные правила согласования определяют зависимости применения продукций в грамматиках $\{G_{ia}\}$ в зависимости от состояния разбора грамматики G_p , которую в дальнейшем будем определять как «реконфигурационную грамматику». Взаимосвязь грамматик существенно повышает возможности существующих МГ по реконфигурации (продукционной адаптации) цепочек вывода в грамматиках $\{G_{ia}\}$, что соответствует реконфигурации процедур МКА на различных этапах, если этим этапам поставить в соответствие отдельные грамматики. При этом правилам согласования поставлены в соответствие взаимосвязи этапов МКА, что позволяет формализовать и анализировать виды многоэтапных комплексных атак.

Проведенный анализ показал, что класс РМГ является развитием общего теоретического аппарата метаграмматик путем добавления в схему метаграмматики нового класса реконфигурационных правил согласования и реконфигурационной грамматики, по существу, в продукционной форме, управляющей реконфигурацией синтаксического анализа в грамматиках $\{G_{ia}\}$ РМГ.

Аналогично другим классам метаграмматик, РМГ допускают применение в схемах $\{G_{ia}\}$, реконфигурируемых по ситуациям, цепочек продукций. При этом используются дополнительные реконфигурационные правила согласования. В результате реконфигурационная грамматика, позволяет явным образом отразить структурную адаптацию реализуемых процедур МКА.

Входящее в РМГ множество грамматик $\{G_i\}$ может быть как конечным, так и бесконечным. В последнем случае должна быть решена проблема порождения (перечисления, рекурсивного задания) множества $\{G_i\}$ и его элементов.

В дальнейшем, аналогично [3], будут рассматриваться только конечные множества $\{G_i\}$. Входящие в эти множества грамматики могут отличаться по типу используемых правил подстановки, различных экстралингвистических отношений, задаваемых мер (вероятностных, нечетких) на множестве правил подстановки. При моделировании МКА с использованием РМГ, аналогично ранее предложенным метаграмматикам [2–16], применяется практически полный спектр известных классов формальных грамматик в $\{G_{ia}\}$.

Определение 2 (Классификация РМГ по типу правил подстановки). Будем называть РМГ метаграмматикой типа i и обозначать $G(i)$, если в ней используются грамматики типа i по классификации Хомского [3], $i=0...3$.

В соответствии с этим определением РМГ будем называть МГ типа 3 (регулярной ОП МГ), если множество $\{G_i\}$ и G_p включает только грамматики типа 3 (регулярные грамматики). Если хотя бы один элемент множеств $\{G_i\}$ и G_p является грамматикой типа 2 (контекстно-свободной грамматикой), то РМГ относится к типу 2 (контекстно-свободная РМГ). То же самое относится к контекстно-зависимым (тип 1) и неограниченным (тип 0) РМГ.

РМГ, аналогично другим метаграмматическим системам, может содержать как однотипные, так и разнотипные грамматики, отличающиеся использованием дополнительных элементов и отношений между входящими в них элементами (грамматики предшествования, управляемого предшествования, программные, графовые (веб), КИ-графовые [2] грамматики и т.п.), а также особенностями задания вероятностных и других мер на множествах правил подстановки и элементах грамматик (стохастические [3], нечеткие [5] грамматики).

Определение 3. Будем называть РМГ однородной, если множества $\{G_i\}$ и G_p состоят из однотипных грамматик (в указанном выше смысле). В противном случае будем называть РМГ неоднородной.

В РМГ могут быть использованы различные правила согласования, отличающиеся видом отображений множеств элементов грамматик $\{G_i\}$ и G_p , физической (семантической) интерпретацией этих отображений в соответствии с особенностями МКА, а также в целом формой задания этих отношений при описании правил в РМГ (рекурсивные, перечислительные и др. формы задания). Исходя из того, что при решении конкретных прикладных задач РМГ может использоваться для спецификации различных элементов МКА, а также исходя из необходимости проведения определенного рода операций над грамматиками $\{G_i\}$ в процессе синтаксического анализа, генерации цепочек признаков элементов атак и т.п., в качестве правил согласования могут использоваться отображения, определяющие различные действия.

В данном случае, помимо правил согласования, описанных в известных работах [2–15], предлагается использовать новые типы правил согласования – реконфигурационные (в обозначениях работы [3] – $RP(i)$ - правила согласования). Данные правила согласования представляются в виде $R_{iki} \rightarrow P_{mj}$, где R_{iki} – элемент грамматики G_p , полученный на очередном шаге синтаксического анализа, P_{mj} – m -й набор разрешенных меток продукции j -й грамматики, входящей в РМГ.

Указанные выше правила согласования могут быть дополнены в соответствии с особенностями решаемых задач и применяемых подклассов грамматик $\{G_i\}$, аналогично [2–15].

Система рассматриваемых правил в РМГ в общем случае может содержать как конечные, так и бесконечные наборы отображений. В дальнейшем будем рассматривать РМГ со схемой, содержащей конечное число правил согласования.

В РМГ могут быть выделены однозначные и многозначные правила согласования, в зависимости от используемых отображений. В данном случае многозначные правила могут использоваться для описания и координации параллельных процессов, происходящих при реализации МКА с использованием нескольких атакующих нарушителей.

В зависимости от типа взаимодействующих элементов грамматик обычные и реконфигурационные правила согласования могут быть также разделены на типы в соответствии со следующим определением.

Определение 4. Правило согласования называется правилом типа $R(L_x)P$, если оно задает отображение элемента грамматик G_p типа R в множество элементов грамматик $\{G_i\}$ типа P , где в качестве обозначений правил согласования используются приведенные выше обозначения, а в качестве обозначений элементов грамматик используются общепринятые указатели типа элементов грамматик: S – начальный символ, T – терминальный символ, N – нетерминальный символ, P – продукция, а также A – атрибут.

При наличии в $\{G_i\}$ и G_p специальных подклассов грамматик, имеющих в своем составе дополнительные элементы и правила (программные грамматики и т.п.), возможно использование правил согласования других типов, задающих отношения между элементами $\{G_i\}$ и G_p , аналогично [3].

Определение 5. Будем называть РМГ метаграмматикой с однородной схемой правил согласования, если схема РМГ состоит из однотипных правил. В противном случае будем называть РМГ комбинированной.

Для рассматриваемых РМГ аналогично [3] использовано также понятие обобщенной схемы.

Определение 6. Обобщенной схемой РМГ называется ориентированная нагруженная сеть вида

$$F_O = (\{G_i\}, G_p, D_O, E, f_O),$$

где $\{G_i\}$ и G_p – непустое конечное множество грамматик, входящих в РМГ (множество помеченных вершин);

D_O – конечная последовательность пар вида $\{G_i, G_j\}$, $i, j=0 \dots 3$, существующих, если имеется хотя бы одно правило согласования (g_i, g_j) вида $AP(i)$;

f_O – отображение множества $\{i, j\}$ в E ($f(i, j)$ – пометки при дугах (g_i, g_j)).

Для более сложных систем правил согласования соответствующим образом должна быть изменена форма задания обобщенной схемы РМГ.

Для РМГ, понятия пути и длины пути в схеме правил согласования интерпретируются аналогично [3]. Для обобщенной схемы РМГ дополнительно определяется путь следующим образом.

Определение 7. Путем длины x в обобщенной схеме РМГ от вершины G_i к вершине G_j называется последовательность пар $(G^*_0, G^*_1) (G^*_1, G^*_2) \dots (G^*_{k-1}, G^*_k)$, где $G_i = G^*_0$, $G_j = G^*_k$ и существует хотя бы один путь вида $AP(i)$ в схеме РМГ длины k от элемента $g_i \in G_i$ до элемента $g_j \in G_j$ (обозначения аналогичны обозначениям в определении 6).

Определение 8. Путь в схеме (обобщенной схеме) РМГ будем называть однородным по типу правил согласования, если все входящие в него пары $(x^*_0, x^*_1) (x^*_1, x^*_2) \dots (x^*_{k-1}, x^*_k)$ (аналогично $(G^*_0, G^*_1) \dots (G^*_{k-1}, G^*_k)$) соответствуют правилам согласования, имеющим одинаковый тип.

Определение 9. Путь в схеме (обобщенной схеме) РМГ, однородный по типу правил согласования называется однородным.

Сведение понятия пути в схеме (обобщенной схеме) РМГ позволяет дать однозначную трактовку ряду других понятий, известных из теории формальных грамматик [3, 12–16], необходимых для описания и моделирования МКА.

Результаты и обсуждение. В ряде практически важных задач моделирования МКА возникает необходимость разбиения множества $\{G_i\}$, аналогично [12], на ряд подмножеств (слоев), стратифицированных по какой-либо системе дополнительных признаков. Подобное разбиение может отражать как объективные структурные свойства моделируемых (специфицируемых) МКА, так и вводиться, исходя из определенных теоретических предпосылок при необходимости сокращения объема метаграмматических моделей, их типизации, уменьшения сложности процедур синтаксического анализа. В дальнейшем подобные РМГ будем называть многоуровневыми или стратифицированными и, если необходимо, явным образом отражать это свойство в записи РМГ аналогично [3].

РМГ создают теоретическую основу для описания, моделирования существующих и новых типов МКА. При этом на структурном уровне качественные свойства РМГ задаются характеристиками однородности состава системы-тройки, связности частных грамматик, входящих в состав РМГ, компактности описания, адаптивности структуры, направленности грамматического разбора. Данные характеристики отражают общие реализационные возможности нового класса метаграмматик. Квалиметрическая диаграмма на рисунке 1 демонстрирует сравнительные возможности МГ общего типа (без реконфигурационных правил согласова-

ния) и реконфигурационных МГ. Квалиметрическая диаграмма построена в пяти-мерном пространстве признаков: 1 – однородность, 2 – связность, 3 – компактность, 4 – адаптивность, 5 – направленность.

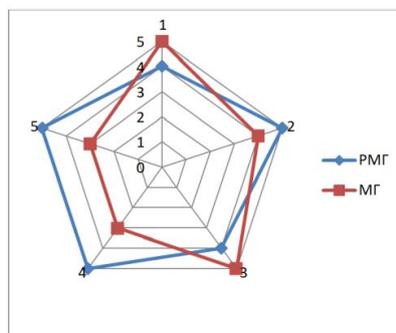


Рис. 1. Квалиметрическая диаграмма МГ и РМГ

Анализ диаграммы на рис. 1 и описанные свойства аппарата РМГ определили следующее:

- ◆ схема метаграмматики позволяет отразить в явном виде многоэтапность правил формирования МКА за счет использования в РМГ разбиения множества $\{G_i\}$, на ряд подмножеств (слоев) или отдельных грамматик, стратифицированных в соответствии с этапами МКА. Прямое структурное соответствие типа МКА и анализирующей ее грамматики обеспечивает межуровневый переход в общем пространстве поиска в соответствующую рассматриваемому типу МКА область графа;
- ◆ схема метаграмматики обеспечивает системную связь правил формирования МКА отдельных этапов за счет использования правил согласования РМГ;
- ◆ правила реконфигурации задают структурную адаптацию МКА при использовании в РМГ специальной реконфигурационной грамматики G_r ;
- ◆ правила реконфигурации согласования позволяют системно управлять модификацией правил согласования нижнего уровня для отдельных этапов МКА.

Выводы. Разработанный класс реконфигурационных МГ включает в свой состав большинство известных подклассов грамматик и позволяет синтезировать набор новых подклассов метаграмматик для решения задач описания и моделирования МКА. Предложенная формализация основных понятий для предложенного класса РМГ создает необходимый теоретический базис для их эффективного использования при моделировании и отражении существующих и перспективных МКА, имеющих структурно-лингвистическое описание. РМГ аналогично существующим МГ используют такие дополнительные элементы, как атрибуты, вероятностные и нечеткие меры, графы и ки-графы, индексы и т.п. [2–6]. Эта преемственность к метаграмматиками общего вида наряду с особыми правилами реконфигурации, позволяет учесть атрибутные (алгебраические, параметрические), стохастические, нечеткие особенности моделируемых МКА и учесть их при синтаксическом анализе. В РМГ за счет учета структурных правил реконфигурации (структурной адаптации) методы синтаксического анализа дополняются необходимыми правилами и критериями выбора при их адаптации, что позволяет существенно повысить эффективность процедур отражения МКА.

В целом, анализ особенностей РМГ, позволяет сделать вывод, что их использование позволяет создать необходимую формальную основу для описания и моделирования МКА, позволяющую, за счет учета особенностей МКА, отразить в моделях все основные структурно-параметрические правила их формирования, необходимые для создания эффективных методов отражения различных классов МКА.

Реконфигурационные МГ целесообразно использовать для структурной обработки многомерных графических образов, имеющих нерегулярную структуру [17, 18]. Также перспективной областью применения построенных производственных систем являются схемы поиска и разрешения конфликтов в системах управления базами знаний, Data Mining системах [19–21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Анищенко А.В., Язов Ю.К.* Сети Петри-Маркова и их применение для моделирования процессов реализации угроз безопасности информации в информационных системах: монография. – Воронеж: Кварта, 2020. – 173 с.
2. *Максимова Е.А., Садовникова Н.П.* Оценка инфраструктурной устойчивости субъекта критической информационной инфраструктуры при деструктивных воздействиях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 4 (221). – С. 155-165.
3. *Атакищев О.И., Борисенков И.Л., Грибунин В.Г., Смирнов Я.Д.* Коллегиальные метаграмматики для моделирования динамично изменяемых программ создания систем информационной безопасности // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2020. – № 4 (190). – С. 29-43.
4. *Атакищев О.И., Аджемов С.С., Емельянов С.Г.* Формальные грамматики, метаграмматики и грамматические структуры. Их применение при принятии управленческих решений. – М.: МТУСИ, 2010. – 345 с.
5. *Атакищев О.И., Борисенков И.Л., Царьков А.Н. Смирнов Я.Д.* Особенности коллегиальных метаграмматик и их использования при решении задач графодинамики // Сб. материалов XV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 223-226.
6. *Емельянов С.Г., Атакищев О.И., Стребков Д.А., Заичко В.А.* Нечеткая многоуровневая модификация метода анализа иерархий и способ определения оценок предпочтительности альтернативных вариантов создания сложных систем космического назначения в условиях повышения неопределенности внешней среды // Известия ЮЗГУ. – 2012. – № 5 (44). – Ч. 2. – С. 50-60.
7. *Атакищева И.В., Емельянов С.Г. [и др.]*. Эталонная модель двойственно-атрибутной транслирующей метаграмматики и структурно-лингвистический способ обработки сложноорганизованных данных // Известия Тульского государственного университета. Серия «Технологическая систематика». – 2006. – Вып. 14. – С. 24-28.
8. *Емельянов С.Г., Атакищева И.В.* Метаграмматические модели для описания вариантов сложноструктурированных стратегий управления // Перспективные системы и задачи управления: Сб. материалов ко 2-й Всероссийской научно-практической конференции. КЧР Домбай, 2007. – С. 23-26.
9. *Емельянов С.Г., Атакищева И.В. [и др.]*. Особенности применения структурно-лингвистического подхода на основе метаграмматик при выборе сложноструктурированных стратегий и программ управления // Современные информационные технологии в деятельности органов государственной власти: Сб. материалов 1-й Всероссийской научно-технической конференции. Курск, 2008. – С. 90-92.
10. *Емельянов С.Г., Атакищева И.В. [и др.]*. Метаграмматические модели для описания сложноструктурированных стратегий управления и оценки рисков их реализации // Современные информационные технологии в деятельности органов государственной власти: Сб. материалов 1-й Всероссийской научно-технической конференции. Курск, 2008. – С. 92-94.

11. *Безкорвайный М.М., Костогрызов А.И., Львов В.М.* Инструментально-моделирующий комплекс оценки качества функционирования информационных систем «КОК». – М.: «Вооружение. Политика. Конверсия», 2001. – 304 с.
12. Искусственный интеллект: в 3-х кн.: справочник / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990.
13. *Городецкий В.И., Дрожжин В.В., Юсупов Р.М.* Многоуровневые атрибутные грамматики для моделирования сложных структурно-динамических систем // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1986. – № 1. – С. 165.
14. *Городецкий В.И., Дрожжин В.В., Полищук Г.М., Юсупов Р.М. [и др.]* Многоуровневые структуры атрибутных грамматик для моделирования сложных организационных систем и их применение в задачах принятия решений // Методы обработки информации и принятия решений: Науч.-техн. сб. (тр.). – М.: МО СССР, 1983. – С. 3.
15. *Николаев А.В., Емельянов С.Г., Гриценко А.В. [и др.]* Особенности применения структурно-алгебраического подхода на основе атрибутных грамматических сетей к описанию топологической структуры сети обмена разнородной информацией распределенной системы поддержки принятия решений // Известия Тульского гос. ун-та. Серия «Бизнес-процессы и бизнес-системы». – 2005. – Вып. 2. – С. 3-9.
16. *Ахо А., Ульман Дж.* Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. – Кн. 1, 2. – М.: Мир, 1978.
17. *Титенко Е.А., Семенухин Е.А., Урясьева М.В.* Модифицированная система Туэ и язык обобщенных конфликтных слов для организации параллельных производственных вычислений // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 5 (67). – С. 32-43.
18. *Гривачев А.В., Емельянов С.Г., Титенко Е.А.* Модифицированная производственная система для решения задачи структурного распознавания образов // Научно-технические технологии. – 2014. – Т. 15, № 12. – С. 9-12.
19. *Емельянов С.Г., Титенко Е.А., Зерин И.С.* Однородные вычислительные структуры для параллельных символьных вычислений // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 6-2 (39). – С. 77-82.
20. *Довгаль В.М., Титов В.С., Титенко Е.А.* Стратегии быстрых символьных вычислений для исчислительной производственной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 2. – С. 44-47.
21. *Максимова Е.А.* Методы выявления и идентификации источников деструктивных воздействий инфраструктурного геноза // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2022. – № 2. – С. 86-99.

REFERENCES

1. *Anishchenko A.V., Yazov Yu.K.* Seti Petri-Markova i ikh primeneniye dlya modelirovaniya protsessov realizatsii ugroz bezopasnosti informatsii v informatsionnykh sistemakh: monografiya [Petri-Markov networks and their application for modeling the processes of implementing information security threats in information systems: monograph]. Voronezh: Kvarta, 2020, 173 p.
2. *Maksimova E.A., Sadovnikova N.P.* Otsenka infrastrukturnoy ustoychivosti sub"ekta kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury pri destruktivnykh vozdeystviyakh [Assessment of infrastructural stability of a subject of critical information infrastructure under destructive influences], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 4 (221), pp. 155-165.
3. *Atakishchev O.I., Borisenkov I.L., Gribunin V.G., Smirnov Ya.D.* Kollegial'nye meta-grammatiki dlya modelirovaniya dinamichno izmenyaemykh programm sozdaniya sistem informatsionnoy bezopasnosti [Collegial meta-grammars for modeling dynamically changing programs for creating information security systems], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2020, No. 4 (190), pp. 29-43.
4. *Atakishchev O.I., Adzhemov S.S., Emel'yanov S.G.* Formal'nye grammatiki, metagrammatiki i grammaticheskie struktury. Ikh primeneniye pri prinyatii upravlencheskikh resheniy [Formal grammars, metagrammatics, and grammatical structures. Their application in making managerial decisions]. Moscow: MTUSI, 2010, 345 p.

5. *Atakishchev O.I., Borisenkov I.L., TSar'kov A.N. Smirnov Ya.D.* Osobennosti kollegial'nykh metagrammatik i ikh ispol'zovaniya pri reshenii zadach grafodinamiki [Features of collegial metagrammatics and their use in solving graphodynamics problems], *Sb. materialov XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Collection of materials of the XV All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective systems and management tasks"]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, pp. 223-226.
6. *Emel'yanov S.G., Atakishchev O.I., Strebkov D.A., Zaichko V.A.* Nechetkaya mnogourovnevaya modifikatsiya metoda analiza ierarkhiy i sposob opredeleniya otsenok predpochitel'nosti al'ternativnykh variantov sozdaniya slozhnykh sistem kosmicheskogo naznacheniya v usloviyakh povysheniya neopredelennosti vneshney sredy [Fuzzy multilevel modification of the hierarchy analysis method and a method for determining the preference estimates of alternative options for creating complex space systems in conditions of increasing uncertainty of the external environment], *Izvestiya YuZGU* [Proceedings of Southwest State University], 2012, No. 5 (44), Part 2, pp. 50-60.
7. *Atakishcheva I.V., Emel'yanov S.G. [i dr.]*. Etalonnaya model' dvoystvenno-atributnoy transliruyushchey metagrammatiki i strukturno-lingvisticheskoy sposob obrabotki slozhnoorganizovannykh dannykh [The reference model of dual-attribute broadcasting metagrammatics and the structural-linguistic method of processing complexly organized data], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Tekhnologicheskaya sistematika»* [Izvestiya Tula State University. The series "Technological systematics"], 2006, Issue 14, pp. 24-28.
8. *Emel'yanov S.G., Atakishcheva I.V.* Metagrammaticheskie modeli dlya opisaniya variantov slozhnostrukturirovannykh strategiy upravleniya [Metagrammatic models for describing variants of complex structured management strategies], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Sb. materialov ko 2-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Promising management systems and tasks: Collection of materials for the 2nd All-Russian Scientific and Practical Conference]. KChR Dombay, 2007, pp. 23-26.
9. *Emel'yanov S.G., Atakishcheva I.V. [i dr.]*. Osobennosti primeneniya strukturno-lingvisticheskogo podkhoda na osnovе metagrammatik pri vybore slozhnostrukturirovannykh strategiy i programm upravleniya [Features of the use of a structural-linguistic approach based on metagrammatics in the selection of complex structured management strategies and programs], *Covremennye informatsionnye tekhnologii v deyatel'nosti organov gosudarstvennoy vlasti: Sb. materialov 1-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern information technologies in the activities of public authorities: Collection of materials of the 1st All-Russian Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2008, pp. 90-92.
10. *Emel'yanov S.G., Atakishcheva I.V. [i dr.]*. Metagrammaticheskie modeli dlya opisaniya slozhnostrukturirovannykh strategiy upravleniya i otsenki riskov ikh realizatsii [Metagrammatic models for describing complex structured management strategies and risk assessment of their implementation], *Covremennye informatsionnye tekhnologii v deyatel'nosti organov gosudarstvennoy vlasti: Sb. materialov 1-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Modern information technologies in the activities of public authorities: Collection of materials of the 1st All-Russian Scientific and Technical Conference]. Kursk, 2008, pp. 92-94.
11. *Bezkorovaynyy M.M., Kostogryzov A.I., L'vov V.M.* Instrumental'no-modeliruyushchiy kompleks otsenki kachestva funktsionirovaniya informatsionnykh sistem «KOK» [instrumental modeling complex for assessing the quality of functioning of information systems "KOK"]. Moscow: «Vooruzhenie. Politika. Konversiya», 2001, 304 p.
12. *Iskusstvennyy intellekt [Artificial intelligence]: In 3 books: handbook, ed. by D.A. Pospelova.* Moscow: Radio i svyaz', 1990.
13. *Gorodetskiy V.I., Drozhzhin V.V., Yusupov R.M.* Mnogourovnevye atributnye grammatiki dlya modelirovaniya slozhnykh strukturno-dinamicheskikh sistem [Multilevel attribute grammars for modeling complex structural and dynamic systems], *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [News of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics], 1986, No. 1, pp. 165.
14. *Gorodetskiy V.I., Drozhzhin V.V., Polishchuk G.M., Yusupov R.M. [i dr.]*. Mnogourovnevye struktury atributnykh grammatik dlya modelirovaniya slozhnykh organizatsionnykh sistem i ikh primeneniye v zadachakh prinyatiya resheniy [Multilevel structures of attribute grammars for modeling complex organizational systems and their application in decision-making tasks], *Metody obrabotki informatsii i prinyatiya resheniy: Nauch.-tekhn. sb. (tr.)* [Methods of information processing and decision-making: scientific and technical collection (works)]. Moscow: MO SSSR, 1983, pp. 3.

15. Nikolaev A.V., Emel'yanov S.G., Gritsenko A.V. [i dr.]. Osobnosti primeneniya strukturno-algebraicheskogo podkhoda na osnove atributnykh grammaticeskikh setey k opisaniyu topologicheskoy struktury seti obmena raznorodnoy informatsiyey raspredelennoy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy [Features of the application of the structural-algebraic approach based on attribute grammatical networks to the description of the topological structure of the network for the exchange of heterogeneous information of a distributed decision support system], *Izvestiya Tul'skogo gos. un-ta. Seriya «Biznes-protsessy i biznes-sistemy»* [News of the Tula State University. The series "Business processes and business systems"], 2005, Issue 2, pp. 3-9.
16. Akho A., Ul'man Dzh. Teoriya sintaksicheskogo analiza, perevoda i kompilyatsii [Theory of syntactic analysis, translation and compilation]. Books 1, 2. Moscow: Mir, 1978.
17. Titenko E.A., Semenikhin E.A., Uryas'eva M.V. Modifitsirovannaya sistema Tue i yazyk obobshchennykh konfliktnykh slov dlya organizatsii paralel'nykh produktsionnykh vychisleniy [The modified Tue system and the language of generalized conflict words for the organization of parallel production calculations], *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information Systems and Technologies], 2011, No. 5 (67), pp. 32-43.
18. Grivachev A.V., Emel'yanov S.G., Titenko E.A. Modifitsirovannaya produktsionnaya sistema dlya resheniya zadachi strukturnogo raspoznavaniya obrazov [Modified production system for solving the problem of structural pattern recognition], *Naukoemkie tekhnologii* [High-tech technologies], 2014, Vol. 15, No. 12, pp. 9-12.
19. Emel'yanov S.G., Titenko E.A., Zerin I.S. Odnorodnye vychislitel'nye struktury dlya paralel'nykh simvol'nykh vychisleniy [Homogeneous computational structures for parallel symbolic computations], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Southwestern State University], 2011, No. 6-2 (39), pp. 77-82.
20. Dovgal' V.M., Titov V.S., Titenko E.A. Strategii bystrykh simvol'nykh vychisleniy dlya ischislitel'noy produktsionnoy sistemy [Strategies of fast symbolic calculations for the calculus production system], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [News of higher educational institutions. Instrumentation], 2008, Vol. 51, No. 2, pp. 44-47.
21. Maksimova E.A. Metody vyyavleniya i identifikatsii istochnikov destruktivnykh voz-deystviy infrastruktornogo gena [Methods of identification and identification of sources of destructive impacts of infrastructural genesis], *Elektronnyy setevoy politematicheskii zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU"* [Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU"], 2022, No. 2, pp. 86-99.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.М. Курейчик.

Атакишев Олег Игоревич – АНО «Институт инженерной физики»; e-mail: aoi007@mail.ru; г. Серпухов, Россия; зам. генерального директора по специальным проектам; д.т.н.; профессор; почетный работник науки и высоких технологий РФ.

Грибунин Вадим Геннадьевич – г.н.с.; д.т.н.; доцент; почетный работник науки и техники РФ.

Ананьев Виталий Евгеньевич – начальник отдела.

Титенко Евгений Анатольевич – Юго-Западный государственный университет; e-mail: johntit@mail.ru; г. Курск, Россия; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем; к.т.н.

Atakishchev Oleg Igorevich – ANO "Institute of Engineering Physics"; e-mail: aoi007@mail.ru; Serpukhov, Russia; deputy director general for special projects of the for special projects; dr. of eng. sc.; professor; honorary worker of science and high technologies of the Russian Federation.

Gribunin Vadim Gennadievich – chief researcher; dr. of eng. sc.; associate professor; honorary worker of science and technology of the Russian Federation.

Ananyev Vitaly Evgenievich – head of the department.

Titenko Evgeny Anatolyevich – South-West State University; e-mail: johntit@mail.ru; Kursk, Russia; leading researcher of the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems. cand. of eng. sc.