

Интеллектуальная технология контекстно-зависимого управления промышленно-природными комплексами*

А. А. Зуенко, Р. А. Македонов, О. В. Фридман, А. Я. Фридман

Аннотация. Совместное использование контекстно-ориентированного подхода, реализующего концепцию программирования в ограничениях (constraints programming), методов концептуального моделирования сложных объектов, ситуационного управления структурной динамикой, нейросетевых технологий для детектирования источников внешних и внутренних возмущений дает возможность увеличить эффективность и оперативность принятия решений по децентрализованному управлению гибкими дискретными системами в условиях меняющейся обстановки и, в конечном счете, повысить устойчивость их функционирования.

Ключевые слова: координация, управление, нейронные сети, контекстно-ориентированный подход к управлению ограничениями, контроль корректности процесса моделирования.

При моделировании сложных объектов, например, промышленных предприятий или их групп, характеризующихся структурной динамикой и обладающих структурной избыточностью подобъектов, актуальной представляется задача обеспечения их устойчивого функционирования (минимальной деградации) под действием возмущений различной природы. В условиях неизбежной неопределенности информации требуется модель предметной области, которая открыта для оперативных модификаций и позволяет сопоставлять различные варианты структуры исследуемого объекта. Однако даже при наличии подобной модели самостоятельную проблему составляет выработка управленческих решений, предпочтительных для формирования желательного поведения объекта с учетом его текущего состояния и ограничений на доступные ресурсы. Принципиальная неполнота знаний о сложных объектах существенно ограничивает применимость классических аналитических моделей. При анализе текущей ситуации и конструировании управляющих воздействий особо перспективным представляется ориентация на методы прикладного искусственного интеллекта, в том числе нейросетевой подход к детектированию и координации возмущающих воздействий и контекстно-ориентированный подход к управлению ограничениями.

В статье предлагается интеллектуальная технология управления сложными нестационарными объектами с иерархической структурой, ориентированная на решение с единых позиций задач стратегического планирования и оперативного управления.

Основой интеграции представленных ниже методов и интеллектуальных технологий повышения устойчивости служит модифицированная технология ситуационного концептуального моделирования, ранее разработанная авторским коллективом. Применение иерархической концептуальной модели предметной области в системе ситуационного концептуального моделирования (ССКМ) дает возможность поэтапно (по мере накопления знаний о предметной области) декларативно представлять разнородные знания об объекте исследования с помощью ГИС-технологий, встроенной экспертной системы и др., а также обеспечивает автоматизацию контроля всех этапов процесса моделирования. ССКМ позволяет производить поиск аналогий при не полностью определенных ситуациях, исследовать вопросы координации управления с учетом организационной структуры объекта, автоматизировать генерацию моделей для решения новых задач управления объектом на основе частных моделей, созданных экспертами для составных частей объекта. Для детектирования возмущающих воздействий (возмущенного узла системы) при решении задачи оперативного управления применяются нейросетевые технологии и градиентный метод координации децентрализованного управления иерархическими и сетевыми структурами. В рамках разраба-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 11-08-00641, 12-07-00550-а, 12-07-00689-а, 13-07-00318-а), Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 16), ОНИТ РАН (проект 2.3 в рамках текущей Программы фундаментальных научных исследований).

тываемой информационной технологии предметно-ориентированные ограничения, как и саму модель предметной области, требуется представлять декларативно, чтобы иметь возможность их оперативно анализировать в ходе моделирования. Поставленные в работе задачи требуют автоматического пополнения и уточнения контекстных ограничений с учетом складывающейся ситуации на исследуемом объекте, для чего модифицирован ранее предложенный авторами метод контекстно-ориентированного управления ограничениями в системах моделирования для слабо формализованных предметных областей.

1. Концептуальная модель как экспертное пространство

Системы концептуального моделирования изначально использовались для проектирования программных комплексов [1, 14], затем область их применения пополнилась исследованиями организационно-технических объектов, в частности природно-промышленных комплексов и социально-экономических систем [16]. Основная цель создания подобных программных систем состоит в автоматизации всех этапов моделирования. Кратко поясним отличие иерархической концептуальной модели (ИКМ) от простых вычислительных моделей.

Простая вычислительная модель [14] определяется как совокупность переменных и частичных отношений между ними. Для представления отношений используются функциональные отображения (операторы).

Простые вычислительные модели позволяют эффективно синтезировать вычислительные процессы на основе заданных отношений лишь для простых ациклических последовательностей обработки.

Для синтеза более сложных вычислений используются *расширенные вычислительные модели*, содержащие дополнительные механизмы управления (операторы цикла, условного перехода и т. п.).

При построении информационных моделей сложных объектов эффективно использование различных приемов декомпозиции (см., например, [2, 10]), с помощью которых задача моделирования сводится к совокупности более простых для формализации и решения подзадач. Один из самых существенных недостатков простых вычислительных моделей и их расширений состоит в том, что они описывают только способы преобразования данных и не позволяют производить структурную декомпозицию данных и процессов их обработки, поэтапно уточняя процесс преобразований. Далее рассмотрим ИКМ, как средство преодоления этого недостатка.

ИКМ представляют собой надстройку над простой или расширенной вычислительной сетью в том смысле, что на множествах процессов (функций) и/или потоков данных (переменных) дополнительно устанавливаются иерархические отношения «часть-целое» или отношения классификации. Это дает возможность, с одной стороны, поэтапно уточнять описание предметной области, а с другой стороны, — автоматически контролировать согласованность описаний исследуемого процесса на различных уровнях декомпозиции, анализируя различного рода структурные ограничения [25].

На уровне интерпретации ИКМ, предназначенные для проектирования программ, обычно представляются двудольным ориентированным графом, в котором выделены два типа вершин: объекты (данные) и функции (процессы обработки данных) [1]. 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. Каждой объектной вершине сопоставляются тип и значение. С каждой функциональной вершиной соотнесены целое число, играющее роль приоритета, и тип. Возможны и другие способы концептуального описания вычислительных процессов.

Все системы концептуального моделирования объединяет то, что в их рамках на основе типизации элементов ИКМ исследуемого объекта разработаны процедуры проверки корректности модели (полнота, связность, разрешимость и т. д.). В результате у пользователя имеется возможность оперативно (по мере уточнения знаний) вносить изменения в ИКМ или создавать модели различных объектов, а затем автоматически проверять их корректность и подключать их в ИКМ.

При переходе от задач синтеза компьютерных программ к задачам моделирования сложных организационно-технических систем возникает необходимость автоматизации контроля корректности всего процесса моделирования, в том числе этапа имитации, и выработки координирующих управляющих воздействий при детектировании возмущений [3].

Для комплексного решения обозначенных задач, возникающих при моделировании промышленно-природных комплексов (ППК), авторами разработана технология ситуационного концептуального моделирования, которая использует специализированную ситуационную концептуальную модель (СКМ) ППК. В рамках СКМ интегрируются пространственно-зависимые данные через ГИС-интерфейс и экспертные знания об изучаемом объекте

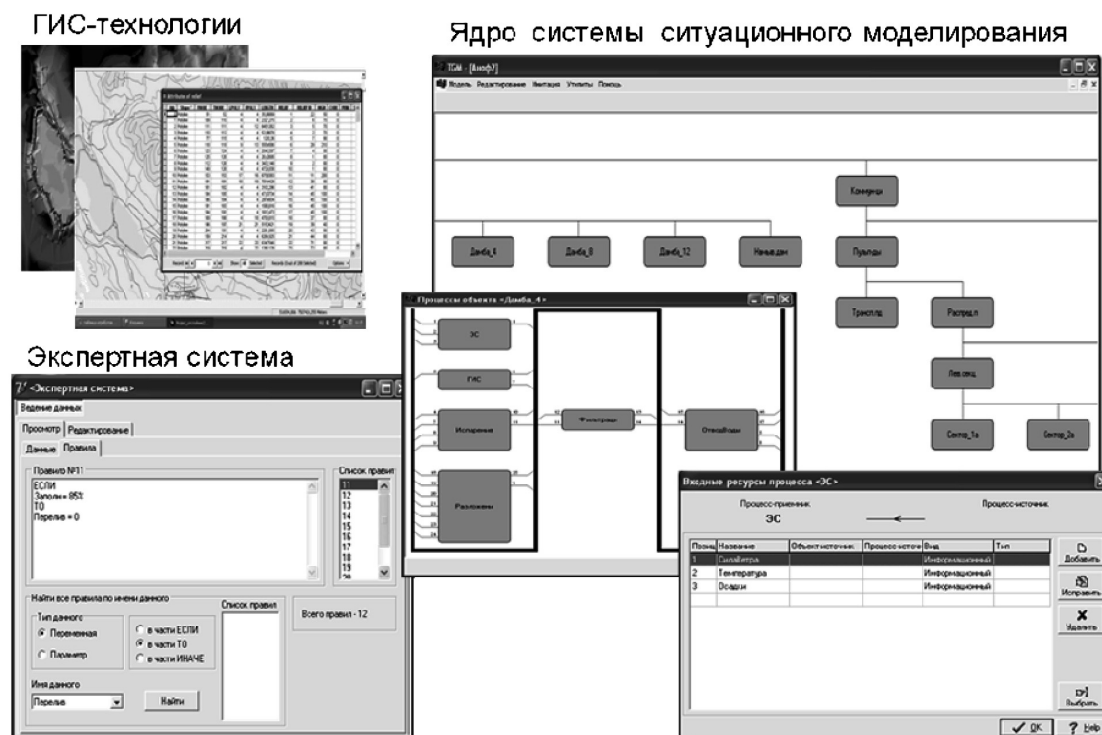


Рис. 1. Система ситуационного моделирования ППК

посредством экспертной системы (рис. 1). Рассматриваемая концептуальная модель состоит из трех сортов элементов и отношений между ними. Элементами концептуальной модели являются: объекты, которые отражают организационную структуру исследуемого ППК; ресурсы, моделирующие потоки данных; процессы — преобразователи входных потоков данных в выходные. Наглядно модель представляется в виде древовидного графа — дерева объектов, отображающего структурные компоненты объекта исследования, связанные с этими объектами задачи и организационные связи между объектами. Корневой объект (объект исследования) определяет глобальную цель моделирования. Иерархичность модели позволяет детализировать описание структуры исследуемого объекта с ростом уровня декомпозиции. Для объектов существует два типа отношения иерархии. Отношение композиции («&») формализует построение объекта агрегацией элементов, а отношение классификации («V») — альтернативное представление различных вариантов объекта верхнего уровня [16]. Каждому объекту может приписываться набор процессов. Таким образом, внутренняя структура каждого объекта модели представляет собой фрагмент сети процессов и ресурсов, которая создается пользователем на этапе построения модели.

Для обеспечения асинхронности в СКМ каждый процесс может иметь задержку в преобразова-

нии входных ресурсов в выходные, обычно не равную и не кратную задержкам других процессов. Для моделирования таких преобразований разработан алгоритм имитации асинхронных процессов по событиям.

Алгоритм состоит из двух этапов: 1) построение расписания — двумерного списка процессов, в котором для каждого процесса указывается время его запуска; 2) обработка значений материальных и информационных ресурсов. Расписание формируется динамически в процессе имитации — каждый процесс после срабатывания устанавливает время своего будущего запуска, например, процесс с задержкой выполнения k , сработавший в момент времени t , помещает себя в подписание процессов на момент времени $t+k$. В отличие от информационных, материальные ресурсы могут изменяться как процессом-источником, так и процессом-приемником. В случае асинхронности этих процессов согласовывается запись значения ресурса источником и приемником, а также решается проблема чтения значения в моменты времени, отсутствующие во временном ряду. Разработанный алгоритм позволяет учесть имеющиеся задержки при преобразовании данных.

СКМ формирует экспертное пространство, с помощью которого могут решаться различные задачи, например, автоматизация контроля корректности процесса моделирования, классификация ситуа-

ций, генерация облика структурно-сложного объекта, координация управляющих воздействий при возникновении возмущений различной природы, расчет надежности и безопасности систем со многими состояниями.

Некоторые подходы к решению перечисленных задач представлены в следующих разделах.

2. Интегрированная технология моделирования сложных организационно-технических объектов

Рассматриваемая информационная технология направлена на решение с единых позиций задач стратегического и оперативного планирования. При стратегическом планировании в данном случае вырабатывается последовательность переключений между альтернативными вариантами структуры исследуемого объекта в зависимости от складывающейся на данном объекте обстановки. Задача же оперативного управления сводится к формированию управляющих воздействий в рамках выбранной структуры при возникновении возмущений.

В настоящее время для решения задач стратегического планирования в ССКМ применяется модифицированная технология ситуационного концептуального моделирования [16]. Суть модификации состоит в применении контекстно-ориентированного подхода к управлению различного рода ограничениями (например, на доступные ресурсы, их значения, на структуру модели, временные ограничения, экологические требования и т. п.) при решении задач моделирования.

Для решения задачи оперативного управления применяется градиентный метод координации децентрализованного управления иерархическими и сетевыми структурами [15, 22], а для детектирования возмущающих воздействий (возмущенного узла системы) используются нейросетевые технологии [4, 21]. Применение контекстно-ориентированного подхода при решении последней задачи обусловлено необходимостью учитывать нелинейность исследуемых объектов, ввиду чего координирующие воздействия для группы возмущенных узлов не равны сумме координирующих воздействий, подаваемых на отдельные узлы системы, а зависят от окружения этих узлов.

Процедура инкрементного ситуационного моделирования с применением представленного контекстного подхода состоит из перечисленных ниже этапов [16].

1. *Мониторинг ситуации* на моделируемой системе по обобщенному критерию качества объек-

та, на котором находится лицо, принимающее решение (ЛПР).

2. *Детектирование изменений* с учетом контекстных ограничений в целях выявления подобъекта, являющего первопричиной проблемы.
3. *Классификация ситуации* на проблемном объекте.
4. *Выявление класса желательных ситуаций на этом объекте* с точки зрения ЛПР.
5. *Анализ чувствительности* с целью поиска точек воздействия.
6. *Выработка управляющих решений* (с учетом контекстов).
7. *Корректировка контекстов* для поддержания их релевантности по отношению к текущей ситуации.

При разработке комплексной имитационной модели динамики сложной природно-промышленной системы были получены следующие основные результаты:

1. Разработан метод пополнения и доопределения описания исходной ситуации с учетом экспертных знаний, а также метод классификации и обобщения ситуаций на основе анализа областей доминирования одного из частных критериев качества функционирования исследуемого объекта в обобщенном критерии качества [15].
2. Создана инструментальная среда ситуационного моделирования, интегрирующая данные имитационного моделирования, ГИС-представление и экспертные знания в ходе вычислительного эксперимента [16].
3. Накоплен опыт ситуационного моделирования отдельных аспектов функционирования ряда природных и промышленных систем (лесных экосистем, региональной энергосистемы, породного массива в зоне проведения горных работ, процессов разделения минеральных полезных ископаемых) [16].
4. Сформулированы необходимые и достаточные условия координируемости локально организованной иерархии динамических систем [15].
5. Разработан контекстно-ориентированный подход к управлению данными в реляционных базах данных проблемно-ориентированных информационных систем [6]. Контексты задач, прикладных программ, запросов и баз данных формируются на основе аппарата многосортных алгебр. При исследовании слабо формализуемых предметных областей использование метода обеспечивает отбор ограничений, актуальных в текущей ситуации обработки запроса, что повышает быстродействие системы. Этот результат вошел в отчет РАН за 2010 год.

6. Разработан алгебраический метод редукции пространства поиска в реляционных базах данных систем моделирования промышленно-природных комплексов [7]. Применение метода позволяет сократить перебор вариантов за счет оперативной настройки системы на конкретную задачу. Результат вошел в отчет РАН за 2011 год.

Ниже кратко представлены некоторые из указанных результатов.

3. Контекстный подход к управлению ограничениями

В рамках информационных технологий контекст определяется как информация, которая может быть использована для описания ситуации, сложившейся в данный момент на некотором объекте [24]. В общем случае контекст используется для определения, какая информация релевантна той или иной ситуации (для той или иной задачи). Учитывая направленность на интеллектуальную поддержку моделирования, контекст включает в себя не только информацию, но и знания, релевантные текущей задаче.

В ССКМ постановка задачи моделирования происходит поэтапно и начинается с описания исследуемой модели и интересующей ситуации в рамках модели с помощью концептов, принятых в системе моделирования. *Исходной ситуацией* называется конечный список фактов, вводимый пользователем при постановке задачи моделирования. На основе анализа исходной ситуации встроенная в ССКМ экспертная система (задавая при необходимости дополнительные вопросы пользователю) доопределяет исходную ситуацию до *полной ситуации*, которой соответствует связный фрагмент модели, возможно, включающий некоторые альтернативы. *Достаточная ситуация* получается из соответствующей ей полной ситуации путем выбора альтернатив, предпочтительных по результатам классификации ситуаций. Достаточные ситуации должны быть предварительно классифицированы по структурам реализации исследуемой системы и упорядочены внутри каждого класса по критерию доминирования вклада одного из скалярных критериев качества объекта, на котором находится ЛПР, в обобщенный критерий качества этого объекта.

Контекстно-ориентированный подход к управлению ограничениями в ССКМ основывается на следующей классификации ограничений: 1) ограничения, описывающие конструкции, допустимые в системе моделирования — *ограничения системы*

моделирования; 2) *ограничения, характерные для элементов* (типов элементов) модели, которые используются в исследуемой предметной области — *ограничения предметной области*; 3) ограничения, присущие элементам (типам элементов), которые входят в данный фрагмент модели (ситуацию) — *ограничения фрагмента модели*; 4) ограничения на значения переменных, формируемые в процессе имитации в рамках заранее выбранного фрагмента модели — *ограничения этапа имитации*.

Программно контекстно-ориентированное управление ограничениями осуществляется на уровне семантического интерфейса реляционных баз данных (БД) ССКМ [9]. Разработанный семантический интерфейс реляционной БД обеспечивает возможность декларативного ввода в систему ограничений, контролирует корректность взаимодействия блоков модели, обеспечивая возможность отслеживать действия блоков модели над общими данными на основе анализа гибко модифицируемых и оперативно подгружаемых предметно-ориентированных ограничений. Применение реляционных баз данных обусловливается необходимостью сопровождать открытую модель предметной области и обеспечивать точность реализации запросов, как в фактографических информационных системах. Эти аспекты работы подробно освещены в [8].

Перечислим некоторые достоинства контекстно-ориентированного управления ограничениями в системах концептуального моделирования.

1. Возможность активировать только те контекстные ограничения, которые актуальны для исследуемой в текущий момент модели предметной области. Это позволяет гибко перенастраивать и оперативно анализировать как ограничения, общие для всего класса допустимых моделей, так и специфичные для конкретной предметной области (фрагмента модели, шага имитации), способствуя уменьшению трудоемкости решаемых задач.
2. На основе анализа контекстов на этапе построения модели обеспечивается более детальный контроль корректности ее структуры, а также состава и правильности подключения расчетных модулей. В результате удастся автоматизировать проверки с точки зрения более широкого набора ограничений.
3. На этапе имитации путем сопоставления незапланированных запросов и контекстных ограничений отслеживаются некорректные обращения к БД системы моделирования, что позволяет выявлять структурные некорректности еще до исполнения запроса и тем самым повысить быстродействие ССКМ.

4. На этапе имитации производится оценка будущих значений ресурсов по их предыдущим значениям, что сокращает перебор в ходе моделирования. Выход исследуемых параметров за допустимые диапазоны значений служит сигналом для «срабатывания» блока координации и управления.

Решение таких задач, как поддержка согласованности БД, анализ незапланированных запросов к ней, контроль подключений программных модулей в рамках контекстно-ориентированного подхода реализуются путем трансляции контекстных ограничений в запросы к БД системы моделирования; это дает возможность контролировать корректность данных моделирования путем оценки результатов запросов. Реляционная БД системы моделирования — это конечное множество таблиц. Таблица состоит из схемы и конкретных данных, где схема — конечный набор *атрибутов*, причем каждому атрибуту соответствует множество значений, называемое доменом. Задача оценки запроса (точнее, конъюнктивного запроса) к БД соответствует конкретному примеру задачи удовлетворения ограничений [11; 18], что достигается простой заменой терминов: «атрибуты» заменяются на «переменные», «таблицы» и «запросы» — на «ограничения», «домены» — на «области возможных значений переменных». С целью ускорения исполнения запросов к БД происходит их предварительное преобразование, обеспечивающее сужение области поиска за счет анализа внутренней структуры запроса, что также сводится к решению задачи удовлетворения ограничений [17].

Приведем простой пример контекстных ограничений, относящихся к задаче моделирования хранения промышленных отходов апатит-нефелиновой обогатительной фабрики (АНОФ II) [16], а именно ограничений, характеризующих процесс разложения пульпы на отходы производства (хвосты) и воду, то есть ограничений исследуемой предметной области. На языке семантического интерфейса структурные ограничения на входы-выходы моделируемого процесса выглядят следующим образом:

$cond = \langle decl, expr \rangle$,

$decl = inresproc(R^{in}, P) \wedge type(P, процесс) \wedge outresproc(R^{out}, P) \wedge type(R^{in}, ресурс) \wedge type(R^{out}, ресурс)$,

$expr = (P.usertype = \text{«Разложение»}) \wedge (R^{in}.usertype = \text{«Пульпа»}) \wedge [(R^{out}.usertype = \text{«Вода»}) \vee (R^{out}.usertype = \text{«Хвосты»})]$,

где: $decl$ — декларация переменных и предикатов/отношений (абстрактный контекст),

$expr$ — логическое выражение над переменными и предикатами, описанными в декларации (прикладной контекст),

$type(var_name, var_type)$ — предикат, сопоставляющий имени переменной ее тип,

$inresproc(resource_name, process_name)$ и $outresproc(resource_name, process_name)$ — предикаты, служащие для описания входных и выходных ресурсов процесса $process_name$ соответственно.

Свойство « $usertype$ » (пользовательский тип), используемое в части $expr$, по умолчанию присуще всем элементам модели.

Применение контекстно-ориентированного подхода к обработке ограничений позволило объединить преимущества таких направлений, как ситуационное концептуальное моделирование и программирование в ограничениях (constraints programming), а также реализовать эти преимущества при автоматизации контроля корректности процесса моделирования. Оперативный анализ контекстов обеспечивает унификацию контроля ошибок при описании пользователем структуры иерархической модели, подключении расчетных модулей, некорректном обращении к данным, а также упрощает детектирование возмущений и сокращает перебор в ходе моделирования.

4. Координация управления иерархическими и сетевыми структурами

Главная задача координации — достижение согласованности в работе всех звеньев системы путем установления рациональных связей (коммуникаций) между ними. Характер этих связей может быть самым различным, так как зависит от координируемых процессов [19, 20].

Для применения разрабатываемого авторами ситуационного подхода к моделированию и, в частности, к координации управлений в сложных динамических комплексах [15, 16], как уже упоминалось, изучаемая динамическая система должна быть представлена в виде иерархически упорядоченного множества объектов (составных частей). Эта иерархия отражает организационные взаимоотношения объектов. Критерий качества работы каждого объекта имеет вид:

$$\Phi ::= \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{a_i - a_{i0}}{\Delta a_i} \right)^2 \right)^{1/2} ::= \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta a_i^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где: a_i — сигналы из списка выходных параметров данного объекта, их общее количество равно m ; a_{i0} и $\Delta a_i > 0$ — настроечные параметры, отражающие требования вышестоящего объекта к но-

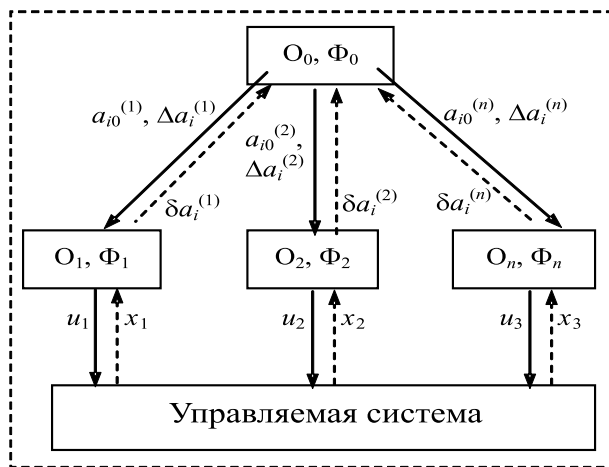


Рис. 2. Двухуровневая многоцелевая система

минальному значению a_i и допустимому отклонению Δa_i от этого значения соответственно; $\delta a_i ::= (a_i - a_{i0}) / \Delta a_i$ — относительное отклонение фактического значения сигнала a_i от его номинального значения a_{i0} .

Если считать a_i скалярными критериями качества работы элемента модели, номинальные значения которых определяются величинами a_{i0} , то (1) представляет собой обобщенный критерий с коэффициентами важности [12], обратно пропорциональными допустимым отклонениям скалярных критериев, что не противоречит здравому смыслу.

Из (1) также следует, что для координации в ССКМ применяется способ прогнозирования взаимодействий. Глобальная задача ставится путем выбора доминирующего скалярного критерия, который должен вносить минимальный вклад в обобщенный критерий (1). Пусть для определенности это будет $a_{i0}^{(0)}$.

Рассмотрим возможности применения критерия (1) для координации локальных управлений при управлении иерархическими и сетевыми объектами.

Будем без потери общности рассматривать двухуровневую систему (рис. 2), в которой объект верхнего уровня (координатор) O_0 , имеющий обобщенный критерий качества Φ_0 типа (1), передает подчиненным ему объектам (подобъектам) $O_1 \dots O_n$, имеющим аналогичные критерии качества, настроечные параметры и получает в качестве сигналов обратной связи относительные отклонения фактических значений локальных критериев качества подобъектов от их номинальных значений. Подобъекты взаимодействуют через управляемую систему и не имеют информации о состоянии других подобъектов, то есть вся система локально организована.

Предлагаемый принцип координации такой системы с точки зрения системного анализа соответствует внешнему (объективному) подходу к оценке

эффективности функционирования подсистем в составе метасистемы и состоит в следующем: задачи подобъектов будут скоординированы относительно задачи координатора, если знак градиента обобщенного критерия координатора по его текущему доминирующему скалярному критерию совпадает со знаками градиентов этого обобщенного критерия по всем текущим значениям скалярных критериев подобъектов.

Из (1) имеем:

$$\frac{\partial \Phi_k}{\partial a_i^{(k)}} = \frac{2}{m_k} \frac{a_i^{(k)} - a_{i0}^{(k)}}{\Delta^2 a_i^{(k)}}, \quad (2)$$

откуда следует, что знак производной можно менять нужным образом, выбирая величину $a_{i0}^{(k)}$ больше или меньше $a_i^{(k)}$. С другой стороны, если считать, что действия всех подобъектов равно важны для достижения цели координатора (возможность обобщения очевидна), то:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_0}{\partial a_i^{(k)}} &= \sum_{j=1}^{m_0} \frac{\partial \Phi_0}{\partial a_j^{(0)}} \frac{\partial a_j^{(0)}}{\partial a_i^{(k)}} = \frac{2}{m_0} \sum_{j=1}^{m_0} \mu_j \frac{\partial a_j^{(0)}}{\partial a_i^{(k)}} \approx \\ &\approx \frac{2}{nm_0} \sum_{j=1}^{m_0} \mu_j \frac{Inc[a_j^{(0)}]}{Inc[a_i^{(0)}]}, \end{aligned} \quad (3)$$

где обозначено: $\mu_j = \frac{a_j^{(0)} - a_{j0}^{(0)}}{\Delta^2 a_j^{(0)}}$, а $Inc[*]$ есть приращение (инкремент) параметра в скобках за предыдущий временной шаг.

Система будет координируема, если координатор выберет все $a_{i0}^{(k)}$ таким образом, чтобы знаки величин (2) (для $k=0$ и $i=1$) и (3) (для всех k от 1 до n и всех i для каждого подобъекта) совпадали.

Полученные достаточные условия координируемости аналогичны идеям обеспечения устойчивости локального управления в коллективах автоматов [13], где требуется положительность частных производных обобщенного критерия типа (1) по входным параметрам соответствующего элемента коллектива.

Для подтверждения эффективности предложенного принципа координации с помощью системы визуального блочного математического моделирования VisSim [5] было выполнено имитационное моделирование двухуровневой системы управления линейным объектом и сетевым объектом. Цель эксперимента состояла в выявлении диапазонов устойчивости локальных управлений и координирующих сигналов к небольшим изменениям динамических характеристик объекта управления (вариациям, в том числе структурным, матрицы динамики объекта) и

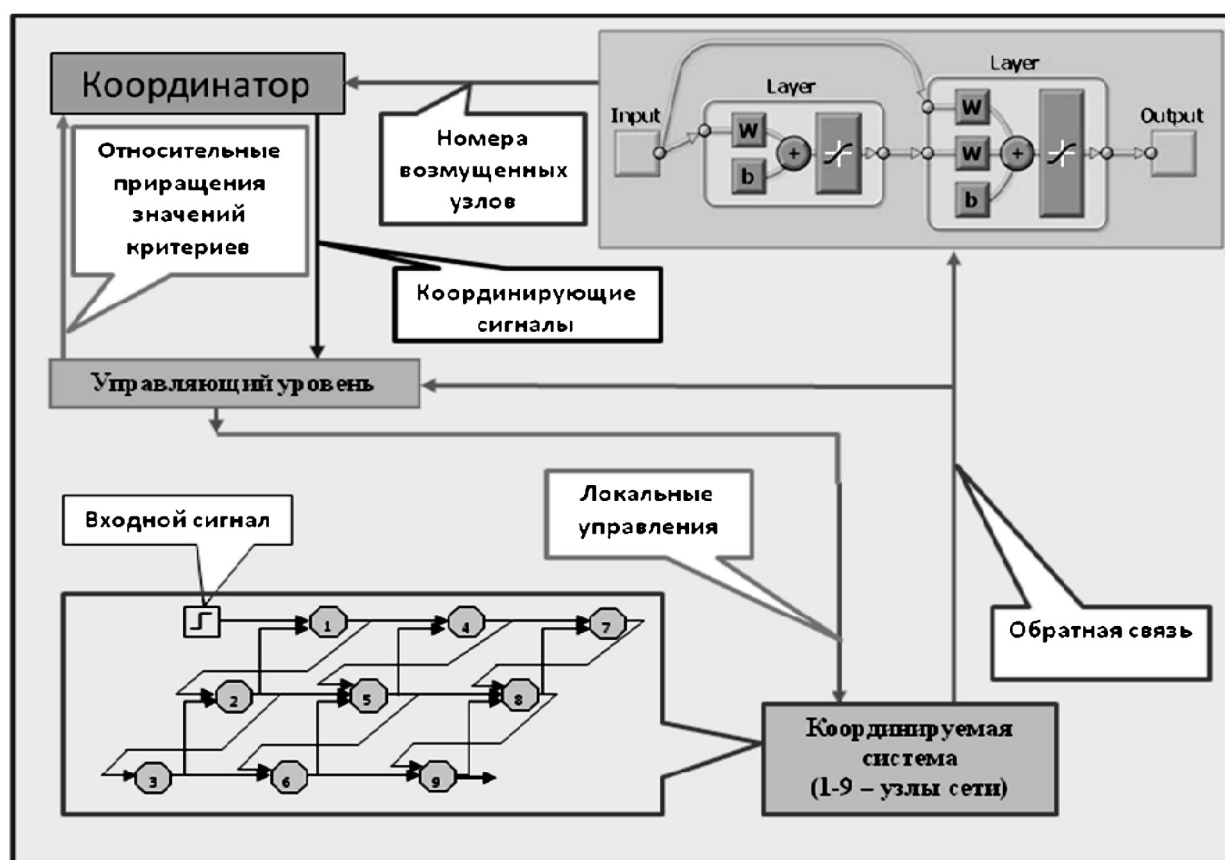


Рис. 3. Упрощенная схема моделируемой системы

уровней задающих воздействий. Кроме того, исследовались возможности повышения быстродействия иерархической и сетевой системы. Результаты моделирования описаны в [21–23], по ним можно сделать вывод, что применение представленного градиентного метода координации для исследованных объектов управления позволяет:

- повысить устойчивость системы к внешним возмущениям и свести к минимуму взаимное влияние узлов сети, если локальные управляющие элементы не искажают намеренно информацию, передаваемую на уровень координатора;
- расширить диапазон устойчивости системы к структурным возмущениям более чем в два раза.

Основной недостаток такого метода координации состоит в том, что координирующие сигналы подаются на все локальные управляющие элементы, а не только на те, которые управляют возмущенными узлами сети. В реальных системах это эквивалентно «наказанию» всех ЛПР, даже непричастных к возникшим неполадкам в работе. На описанных выше этапах моделирования возмущение на отдельные узлы исследуемых систем подавалось «вручную», в каждый момент времени было известно,

какой именно узел модели подвергается внешнему (или внутреннему, структурному) воздействию. В реальных системах эта информация отсутствует, что требует реакции всех подсистем на возмущения, порожденные только одной из них. Поэтому далее был разработан метод поиска «возмущенного» узла(ов) моделируемой системы. Для решения этой задачи в качестве «поискового» блока предложено использовать нейронную сеть.

Для изучения реакции системы на возмущение в динамике протестирована распознающая способность нейронных сетей, которые могут быть построены в среде VisSim. Моделировались нейронные сети различной структуры. Наиболее подходящей признана сеть Кохонена, на базе которой смоделирован нейросетевой блок. На рис. 3 приведена упрощенная схема моделируемой системы.

Обучение производится на идеальном сигнале, каждая сеть обучается распознавать возмущение на соответствующем узле системы. Были проведены исследования по определению возбужденных узлов моделируемой системы и по оценке эффективности работы нейроблока в случае внешнего возбуждения, подаваемого на несколько узлов сети. Моделиро-

вание показало, что, как и следовало из теории, эффективность работы нейроблока с ростом числа возбуждаемых блоков падает, как с точки зрения уменьшения установившейся погрешности, так и времени компенсации для возбуждаемых блоков.

Проведены исследования по реакции «невозбуждаемых» узлов в случае внешнего возбуждения. Например, при подаче внешнего возмущения на первый узел в отсутствие нейронной сети на седьмом (невозбуждаемом) узле возникает реакция. Подключение нейроблока примерно вдвое сокращает время, необходимое для компенсации этой реакции, и снижает установившуюся погрешность, т. е. уменьшает возбуждение узла.

При моделировании структурных возмущений, как и при внешнем воздействии, подключение нейроблока выявило возбуждение не только на узле, на который подается структурное возмущение, но и на других узлах сети. Выборочная координация (в соответствии с информацией поискового блока о возбужденных узлах сети) позволяет расширить диапазоны устойчивости моделируемой системы, что в реальной системе приведет к существенной экономии ресурсов, так как координирующие воздействия нужно подавать не на все узлы сети.

По результатам модельного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Проведены исследования по определению возбужденных узлов моделируемой системы. Нейроблок правильно определяет номера узлов, на которые подается одиночное внешнее возмущение в диапазоне возмущений 3–100 % от тестового возмущения (на котором обучалась сеть) в диапазоне времен моделирования 10–100 %.
2. Подключение нейроблока приводит к уменьшению установившейся погрешности по сравнению с полной координацией при подаче внешнего возмущения как на одиночный узел, так и на несколько узлов.
3. При подаче внешнего возмущения на несколько узлов сеть выявила реакцию на возмущение не только на возмущаемых узлах, но и на связанных с ними.
4. Для невозбуждаемых узлов при подключении нейроблока время компенсации внешнего воздействия примерно вдвое сокращается, а возбуждение уменьшается.
5. При моделировании структурных возмущений, так же как и при внешнем воздействии, подключение нейроблока выявило возбуждение не только на узле, на который подается структурное возмущение, но и на других узлах сети. Выборочная координация (в соответствии

с информацией поискового блока о возбужденных узлах сети) позволяет расширить диапазоны устойчивости моделируемой системы, сократить время компенсации воздействия в два раза, снизить значение установившейся погрешности.

6. Эффективность работы нейроблока с ростом числа возмущаемых узлов падает, как с точки зрения уменьшения установившейся погрешности, так и времени компенсации для возбуждаемых узлов.

5. Заключение

Совместное использование контекстно-ориентированного подхода, представленного в настоящей работе и реализующего концепцию constraints programming, методов концептуального моделирования сложных объектов, ситуационного управления структурной динамикой, нейросетевых технологий для детектирования источников внешних и внутренних возмущений дает возможность значительно повысить эффективность и оперативность принятия решений по управлению гибкими дискретными системами в условиях меняющейся обстановки и, в конечном счете, обеспечить их устойчивое функционирование. Оперативный анализ контекстов позволяет унифицировать контроль ошибок при описании пользователем структуры иерархической модели, подключении расчетных модулей, некорректном обращении к данным, а также упростить детектирование возмущений и сократить перебор в ходе моделирования.

Литература

1. Бржезовский А. В. Синтез моделей вычислительного эксперимента / Бржезовский А. В. и др. СПб: Наука, 1992. 231 с.
2. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. М.: Советское радио, 1993. 439 с.
3. Виноградов А. Н. Динамические интеллектуальные системы. II. Моделирование целенаправленного поведения / А. Н. Виноградов, Л. Ю. Жиликова, Г. С. Осипов // Известия РАН. Теория и системы управления. М: Наука, 2003. № 1. С. 87–94.
4. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Управление и нейронные сети / А. Е. Городецкий, И. Л. Тарасова. СПб.: Издательство политехнического университета, 2005. 312 с.

5. Дьяконов В. П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 384 с. (Серия «Полное руководство пользователя».)
6. Зуенко А. А. Контекстный подход в системах сопровождения открытых моделей предметной области / А. А. Зуенко, А. Я. Фридман // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. № 3. С. 41–51.
7. Зуенко А. А. Метод семантического анализа нерегламентированных запросов в реляционной базе данных с иерархической структурой / А. А. Зуенко, А. Я. Фридман // Труды ИСА РАН. Прикладные проблемы управления макросистемами / Под ред. Ю. С. Попкова, В. А. Путилова. Т. 39. М.: Книжный дом «Либроком»/URSS, 2008. С. 141–159.
8. Зуенко А. А. Анализ контекстов при моделировании слабо формализованных предметных областей / А. А. Зуенко, Б. А. Кулик, А. Я. Фридман // Двенадцатая нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием КИИ-2010, г. Тверь, Россия, 20–24 сентября 2010 г.: Тр. конф. Т. 2 М.: Физматлит, 2010. С. 164–172.
9. Зуенко А. А. Унификация обработки данных и знаний на основе общей теории многоместных отношений / А. А. Зуенко, Б. А. Кулик, А. Я. Фридман // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. Вып. 3. С. 52–62.
10. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. М.: Мир, 1993. 344 с.
11. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ / С. Рассел, П. Норвиг. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1408 с.
12. Салуквадзе М. Е. Задачи векторной оптимизации в теории управления. Тбилиси: Мецниереба, 1975. 202 с.
13. Стефанюк В. Л. Локальная организация интеллектуальных систем. М.: Физматлит, 2004. 328 с.
14. Тыгу Э. Х. Концептуальное программирование. М.: Наука, 1984. 255 с.
15. Фридман А. Я. Градиентный метод координации управлений иерархическими и сетевыми структурами / А. Я. Фридман, О. В. Фридман // Информационно-управляющие системы. 2010. № 6. С. 13–20.
16. Фридман А. Я. Ситуационное моделирование природно-технических комплексов / А. Я. Фридман, О. В. Фридман, А. А. Зуенко. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. 436 с.
17. Kulik B., Fridman A., Zuenko A. Logical Inference and Defeasible Reasoning in N-tuple Algebra // Diagnostic Test Approaches to Machine Learning and Commonsense Reasoning Systems. IGI Global. P. 102–128.
18. Ceri S., Gottlob G., Tanca L. Logic Programming and Databases. Surveys in Computer Science. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1990.
19. Drouin M., Abou-Kandil H., Mariton M., Duc G. Une nouvelle methode de decompozision-coordination 1-re partie: Principe et mise en ocuvre. APII. 1985. № 3. P. 205–226.
20. Duc G., Drouin M., Mariton M., Abou-Kandil H. Une nouvelle methode de decomposition-coordination. 2-e partie: Application a la compensation des systemes multivariables. APII. 1985. № 3. P. 227–242.
21. Fridman A. Combining Neural Networks and Incremental Techniques for Coordination in System of Systems / A. Fridman, O. Fridman // Cybernetics and Systems 2012: Proceedings of Twentieth European Meeting on Cybernetics and Systems Research (EMCSR 2012), 2012, Vienna, Austria. P. 203–207.
22. Fridman A. Gradient Coordination Technique for Controlling Hierarchical and Network Systems / A. Fridman, O. Fridman // Systems Research Forum. Vol. 4. № 2 (2010). P. 121–136.
23. Fridman A. Incremental Coordination in Collaborative Networks / A. Fridman, O. Fridman // Proceedings of International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT-2010). October 18–20, 2010. Moscow, Russia [Electronic resource] (CD-ROM). Paper № 1569337294.
24. Smirnov A. Context-Driven Decision Support for Megadisaster Relief / A. Smirnov, T. Levashova, N. Shilov // Journal of Emergency Management. Prime National Publishing Corporation, September/October, 2006. Vol. 4–5. P. 51–56.
25. Wilson I. D. Foundations of hierarchical control // International Journal of Control. 29. № 6. 1979. P. 899–933.

Зуенко Александр Анатольевич. Научный сотрудник Института информатики и математического моделирования технологических процессов КолНЦ РАН. К. т. н. Окончил в 2005 г. Петрозаводский государственный университет. Количество печатных работ: 70. Область научных интересов: системы моделирования на основе открытой концептуальной модели предметной области, искусственный интеллект, представление и обработка знаний. E-mail: zuenko@iimm.kolasc.net.ru

Македонов Роман Александрович. Стажер-исследователь Института информатики и математического моделирования технологических процессов КолНЦ РАН. В 2005 г. окончил Петрозаводский государственный университет. Количество печатных работ: 15. Область научных интересов: системы моделирования на основе открытой концептуальной модели предметной области, искусственный интеллект, представление и обработка знаний. E-mail: makedonov@iimm.kolasc.net.ru

Фридман Ольга Владимировна. С. н. с. Института информатики и математического моделирования технологических процессов КолНЦ РАН. К. т. н. Окончила в 1984 г. Петрозаводский государственный университет. Количество печатных работ: 130 (в т. ч. 1 монография). Область научных интересов: прикладные интеллектуализированные системы, экспертные системы, нейронные сети. E-mail: ofridman@iimm.kolasc.net.ru

Фридман Александр Яковлевич. Вед. н. с. Института информатики и математического моделирования технологических процессов КолНЦ РАН. Д. т. н., профессор. Окончил в 1975 г. Ленинградский электротехнический институт. Количество печатных работ: 230 (в том числе 4 монографии). Область научных интересов: моделирование комплексных технологий и их воздействия на окружающую среду, прикладные интеллектуализированные системы. E-mail: fridman@iimm.kolasc.net.ru